

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**EVOLUÇÃO DA NOÇÃO DA FERTILIDADE E SUA PERCEPÇÃO COMO
UMA PROPRIEDADE EMERGENTE DO SISTEMA SOLO**

Margarete Nicolodi
(Tese de doutorado)

Porto Alegre, 2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**EVOLUÇÃO DA NOÇÃO DA FERTILIDADE E SUA PERCEPÇÃO COMO
UMA PROPRIEDADE EMERGENTE DO SISTEMA SOLO**

MARGARETE NICOLODI
Engenheira Agrônoma (UNICRUZ)
Mestre em Ciência do Solo (UFRGS)

Tese apresentada como
um dos requisitos à obtenção do
Grau de Doutor em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS) Brasil
Abril de 2007

CIP - CATALOGAÇÃO INTERNACIONAL NA PUBLICAÇÃO
Biblioteca Setorial da Faculdade de Agronomia da UFRGS

N651e Nicolodi, Margarete
Evolução da noção da fertilidade e sua percepção como uma
propriedade emergente do sistema solo / Margarete Nicolodi. ---
Porto Alegre : M. Nicolodi, 2007.

xvii, 140f.; il.

Tese(Doutorado – Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação
em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal
do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

1. Fertilidade do solo. I.Título.

CDD: 631.4

MARGARETE NICOLodi
Engenheira Agrônoma - UNICRUZ
Mestre em Ciência do Solo - UFRGS

TESE

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

DOUTOR EM CIÊNCIA DO SOLO

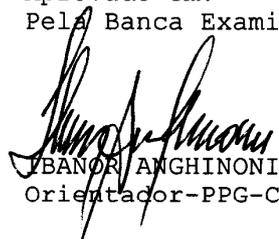
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo

Faculdade de Agronomia

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

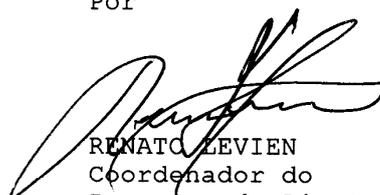
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 04.04.2007
Pela Banca Examinadora



IVANOR ANGHINONI
Orientador-PPG-Ciência do Solo

Homologado em: 25.04.2007
Por



RENATO LEVIEN
Coordenador do
Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo



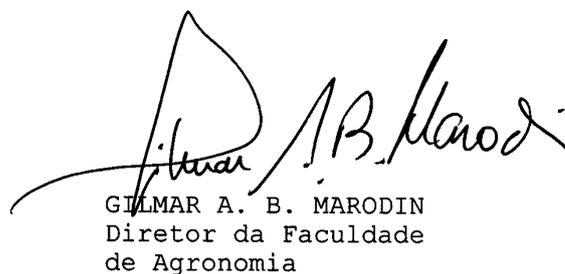
CLÉSIO GIANELLO
PPG Ciência do Solo/UFRGS



LUÍZ RENATO D'AGOSTINI
UFSC



JOSE ELÓI DENARDIN
EMBRAPA-Trigo



GILMAR A. B. MARODIN
Diretor da Faculdade
de Agronomia

Aos meus amores dedico essa conquista.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), ao Departamento de Energia na Università Politécnica delle Marche (UnivPM) e à CAPES pela oportunidade e pelo suporte para o meu aperfeiçoamento.

Ao Prof. Ibanor Anghinoni pela orientação, pela amizade, pela confiança, por aceitar que eu trabalhasse num assunto totalmente novo, inclusive para ele, e pelo apoio financeiro para suprir as demandas da tese.

Ao Prof. Clésio Gianello pela orientação, pela amizade, pela cumplicidade, pelo estímulo para melhorar o entendimento e a avaliação da fertilidade do solo, sem medo do desconhecido e pela disponibilidade em ajudar no trabalho, principalmente, na construção da tese — *grazie mille, siamo finiti!*

Ao Prof. Jacques Marré pela orientação, pelo incentivo e pela dedicação para melhorarmos o entendimento da fertilidade e do solo — sua ajuda foi muito valiosa para a minha formação e para a tese.

Aos Professores Davide Neri e Franco Zucconi pela confiança, pela amizade e pela orientação durante o estágio na UnivPM em Ancona, na Itália.

Aos Professores João Mielniczuk (UFRGS), Otávio Antônio de Camargo (IAC), Luiz Renato D'Agostini (UFSC) e Sandro Luiz Schlindwein (UFSC) pelo estímulo e pelas contribuições para a elaboração da tese.

Por permitir avaliar os experimentos, pela ajuda no campo e na coleta dos resultados determinados anteriormente na COTRISA, em Santo Ângelo, aos Engenheiros Agrônomos Amando Dalla Rosa e João Becker e ao Técnico Agrícola Giordani Desordi; na EMBRAPA – Trigo, em Passo Fundo, aos Doutores José Eloir Denardin e Rainoldo Alberto Kochhann; na Estação Experimental Agronômica da UFRGS, em Eldorado do Sul, aos Professores João Mielniczuk e Cimélio Bayer.

Aos colegas de Pós-Graduação pela amizade, em especial, na UFRGS, a Adriana Kleinschmitt, Analu Mantovani, Carlos Gustavo Tornquist, Cláudio Kray, Elisandra Oliveira, Leandro Bortolon, Maria Cândida Nunes e Rafael Borges, na UnivPM, ao Enrico Lodolini e ao Gianluca Savini.

A Rosane, a Nira, a Daiane e à equipe do LAR pelo carinho e proteção.

Aos meus familiares pelo incentivo.

À MÃE (Maria Neusa), generosa, consolo nas horas difíceis; ao PAI (Neri), ao DECO (Vanderlei) e ao BATISTA (Marcos Batista), muito mais do que irmãos, amigos do coração, meu profundo agradecimento pela proteção, pela preocupação, pelo apoio financeiro, pela cumplicidade, pelo estímulo e pelo amor.

A Deus pela vida, pela saúde, pela minha família, pelas inúmeras oportunidades concedidas — entre elas a de estudar —, pela proteção, por renovar minhas esperanças, por me dar força para superar as dificuldades, pelas pessoas maravilhosas que pôs no meu caminho e por transformar meus sonhos em realidade.

Muito obrigada.

EVOLUÇÃO DA NOÇÃO DA FERTILIDADE E SUA PERCEPÇÃO COMO UMA PROPRIEDADE EMERGENTE DO SISTEMA SOLO^{1/}

Autora: Margarete Nicolodi

Orientador: Prof. Ibanor Anghinoni

RESUMO

O homem já havia associado produção de alimentos a solo fértil antes de praticar a agricultura e desenvolveu, assim, um conceito de fertilidade muito antes do conceito de solo. Muitos eventos contribuíram para a mudança na noção de fertilidade desde a primeira teoria de Columella (século I) até a mineralista (século XIX). Segundo esta, a fertilidade depende dos nutrientes solúveis no solo. Apesar do extraordinário progresso na agricultura promovido por sua aplicação, ainda no final daquele século muitos não concordavam com esse conceito, restrito às condições químicas do solo. No século XX, surgiram novas percepções de fertilidade solo, mais claras, porém o conceito tradicional continuou sendo amplamente utilizado no mundo. Apesar dos benefícios de sua aplicação no aumento da fertilidade dos solos e na produtividade das culturas, se verifica tanto em lavouras como em experimentos de campo, que a avaliação e, conseqüentemente, o conceito tradicional nem sempre expressam adequadamente a fertilidade do solo percebida pelas plantas. Isso pôde ser verificado principalmente pelas avaliações feitas nos solos cultivados por longo tempo no sistema plantio direto. A insuficiência percebida na teoria, desde o final de século XIX, e na prática, desde o início do século XXI, evidencia ser este um momento propício à mudança na noção da fertilidade do solo, evoluindo para um novo conceito e, conseqüentemente, uma nova avaliação e recomendação de outras práticas para melhorá-la, além da adubação e correção do solo. Há a expectativa de que a fertilidade seja percebida de maneira ampla e conceituada como uma propriedade emergente do funcionamento do sistema solo, isto é, a expressão da interação entre todas as condições dadas por ele para o desenvolvimento e a produtividade das plantas.

¹ Tese de Doutorado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (140 p.) Abril, 2007. Trabalho realizado com apoio financeiro da CAPES.

EVOLUTION OF SOIL FERTILITY CONCEPT AND ITS PERCEPTION AS AN EMERGENT PROPERTY OF THE SOIL SYSTEM^{1/}

Author: Margarete Nicolodi

Adviser: Prof. Ibanor Anghinoni

ABSTRACT

Man kind had already associated fertile soil and food production even before practicing agriculture, and developed, in this way, a soil fertility concept much earlier than the proper soil concept. Several events had contributed for changing the soil fertility concept since the first Columella theory (First Century) up to the mineralist theory (XIX Century). According to this theory, soil fertility depends upon soluble mineral salts (nutrients) in the soil. In spite of the extraordinary progress in agriculture due to the application of this concept, there was no unanimity about such concept, restricted to soil chemical conditions, even at the end of XIX Century. Even with the new perceptions about soil fertility that arose in the XX Century, the traditional concept was still commonly used around the world. In spite of the increase in soil fertility and crop yield due to the application of such concept, it can be observed that its evaluation and, consequently, the traditional concept does not always express the soil fertility noted by plants in both, farm fields or field experiments. This can be verified mainly in evaluations done in long term no-tilled soils. The limitations in such theory, since the end of XIX Century, and in the day-to-day experience since the beginning of XX Century, indicate this as the most likely moment for a change in the perception of the soil fertility. As a consequence, a new concept would be derived and, consequently, new evaluation methodologies, and recommendations of practices, other than just fertilizing and liming. It is expected that the fertility would be perceived and conceptualized as an emergent property of the soil as a system; this is the expression of all conditions given by the soil for plant development and productivity. It is possible that the new concept, a wider one, could express the fertility of the soil system better than the one being used, which restricts soil fertility to soil chemistry.

¹ Doctoral thesis in Soil Science – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (140 p.) April, 2007.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	01
2. A AGRICULTURA E A NOÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO	03
2.1 A agricultura e sua evolução.....	03
2.2 A noção da fertilidade do solo.....	05
2.2.1 Evolução da noção da fertilidade do solo: uma visão geral....	06
2.2.1.1 Na Antigüidade	07
2.2.1.2 Na Idade Média.....	09
2.2.1.3 Da Idade Moderna à Contemporânea	10
2.2.2 Evolução do conceito da fertilidade do solo no Brasil.....	20
3. APLICAÇÃO DO CONCEITO TRADICIONAL E A SUA INSUFICIÊNCIA PARA EXPRESSAR A FERTILIDADE DO SOLO PERCEBIDA PELAS PLANTAS	23
3.1 Aplicação do conceito tradicional da fertilidade do solo no Rio Grande do Sul.....	23
3.1.1 Evolução do uso agrícola dos solos no Rio Grande do Sul.....	26
3.1.2 Evolução da fertilidade em solos do Planalto do Rio Grande do Sul.....	33
3.2 A insuficiência do conceito tradicional para expressar a fertilidade do solo percebida pelas plantas.....	41
3.2.1 Relações clássicas da fertilidade do solo.....	45
3.2.2 “Ruído” nas etapas do processo de avaliação da fertilidade nos solos cultivados no sistema plantio direto.....	50
3.2.3 Tentativas para diminuir o “ruído” na avaliação da fertilidade: interpretar seus indicadores de outros modos.....	60
3.2.3.1 Evolução da relação entre os indicadores de fertilidade do solo e a produtividade das culturas.....	60
3.2.3.2 Sensibilidade dos indicadores de fertilidade para expressar a mudança do sistema de cultivo.....	66
3.2.3.3 Aplicação da técnica da normalização aos resultados de indicadores para identificar níveis de fertilidade nos solos..	71
3.2.4 Insuficiência da avaliação e do conceito tradicional para expressar a fertilidade do solo percebida pelas plantas.....	78
4. ANALOGIA DA EVOLUÇÃO DA NOÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO E DA SUA PERCEPÇÃO NESTE MOMENTO À DOS SISTEMAS ABERTOS	80
4.1 Analogia da evolução da noção da fertilidade à dos sistemas abertos	81
4.2 Análise da noção da fertilidade no momento atual.....	86
5. FERTILIDADE COMO PROPRIEDADE EMERGENTE E O SOLO COMO SISTEMA SEDE	88
5.1 Solo: um sistema aberto.....	99
5.2 Formação do sistema solo e da sua fertilidade.....	92
5.3 Funcionamento e funções do sistema solo.....	93
5.4 Fertilidade: uma propriedade emergente do sistema solo.....	96

6. POSSÍVEIS AÇÕES PARA MELHORAR A AVALIAÇÃO E A FERTILIDADE DO SOLO	100
6.1 A noção da fertilidade do solo no futuro.....	100
6.2 Práticas para aumentar e manter a fertilidade do sistema solo..	102
6.3 A fertilidade do sistema solo e a sustentabilidade na agricultura.	104
7. CONCLUSÕES	105
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106
9. APÊNDICES	116

RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
01. Distribuição percentual dos teores de matéria orgânica e de fósforo nos solos de dez regiões fisiográficas do RS em faixas de fertilidade (ASCAR, 1969).....	29
02. Perdas médias de solo por erosão sob chuva natural de quatro anos agrícolas ¹ , em diferentes sistemas de cultivo e manejo da palha, com rotação trigo/soja, em Passo Fundo (Wünche & Denardin, 1980).....	31
03. Valores médios de indicadores de fertilidade avaliados nos municípios de Santa Rosa e de Ibirubá, nas regiões do Alto Vale do Uruguai e do Planalto Médio e no Estado do RS [Adaptado de Associação (1967) e de Porto (1970)]......	37
04. Evolução dos principais indicadores de fertilidade do solo avaliados em experimentos com diferentes históricos de cultivo em Eldorado do Sul entre 1985 e 2005 (PVd: 0-10 cm).	61
05. Valores mínimos e máximos reais dos indicadores de fertilidade utilizados na normalização dos dados avaliados em Eldorado do Sul, Passo Fundo e Santo Ângelo (Apêndice 7)....	73
06. Valores mínimos e máximos normalmente encontrados dos indicadores de fertilidade utilizados na normalização dos dados de solo avaliados em Eldorado do Sul, Passo Fundo e Santo Ângelo e bases de cálculo do rendimento relativo de grãos em cada local.....	73

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
01. Regiões agroecológicas do Estado do RS e as Colônias Velhas e Novas (Secretaria da Agricultura e Abastecimento do RS, 1994)..	27
02. Expansão do cultivo da soja em áreas de mata, em Santa Rosa e Ibirubá, e de campo natural, em Cruz Alta, no Planalto Médio do RS entre 1955 e 1980 (EMATER, 2007)	28
03. Mudança do sistema de cultivo do solo no Planalto Médio (a) e na área cultivada no SPD com milho na rotação de culturas em Cruz Alta (b) [(a): Mielniczuk et al., 2000; (b): CAT de Cruz Alta – dados não publicados].....	32
04. Evolução do rendimento de grãos da soja em Santa Rosa, Ibirubá, Cruz Alta e no RS e da área cultivada com soja no RS e relações com os principais programas de melhoria da fertilidade e conservação do solo (Adaptado de EMATER, 2007).....	34
05. Evolução das faixas dos indicadores de fertilidade do solo — pH em água (a), matéria orgânica (b) e fósforo disponível (c e d) — nas regiões do Planalto Médio (PM) e do Alto Vale do Uruguai (AVU) e no Estado do Rio Grande do Sul (RS) (nos levantamentos de 1981 e 1988, a região do PM foi considerada a do Alto do Jacuí e a região do AVU a Colonial de Santa Rosa; de 1988 e de 1997 a 1999, faixas de pH correspondem a $\leq 4,9$; 5,0-5,4 e $\geq 5,5$).....	36
06. Evolução das faixas dos indicadores de fertilidade do solo — pH em água (a), matéria orgânica (b) e fósforo (c) e potássio disponíveis (d) — em Santa Rosa e em Ibirubá nas últimas quatro décadas.....	38
07. Evolução dos valores e dos teores médios dos indicadores de fertilidade do solo — pH em água (a), matéria orgânica (b) e fósforo (c) e potássio disponíveis (d) — em Santa Rosa e Ibirubá [(a) e (c): Mielniczuk & Anghinoni (1976); (d) Porto (1970)].....	39
08. Rendimento relativo de grãos de trigo, soja e milho obtidos em 2003 no RS comparados àqueles de 1960 (Adaptado de EMATER, 2007).....	40
09. Mudança relativa de indicadores das condições biológicas do solo no SPD em relação ao SC em Londrina [avaliação feita aos 16 anos do experimento (LRd: 0-10 cm); adaptado de Balota et al. (1998)].....	42
10. Distribuição das classes de diâmetros de agregados, na camada de 0-10 cm, em solo com diferentes históricos de cultivo em Eldorado do Sul (PVd: 0-10 cm) (a) e em Santo Ângelo (b) (LVdf: 0-10 cm) [avaliações feitas em experimentos conduzidos há mais de 20 anos; (b) Conceição (2006)]	43

11. Mudança nos valores dos indicadores de fertilidade — fósforo (a) e potássio (b) disponíveis, alumínio trocável (c) e matéria orgânica (d) — em solos cultivados no SC e no SPD, com diferentes rotações de culturas em vários locais (avaliações feitas em experimentos conduzidos há mais de 20 anos; milho com adubação nitrogenada).....	44
12. Relações clássicas entre indicadores de fertilidade — pH em água e alumínio trocável (a) e saturação por bases (b), alumínio trocável e saturação por alumínio (c), matéria orgânica e alumínio trocável (d), pH em água e CTC efetiva (e) e matéria orgânica e CTC efetiva (f) — em experimentos com diferentes históricos de cultivo, conduzidos há mais de 20 anos em Eldorado do Sul (PVd: 0-10 cm).....	46
13. Relações entre nitrogênio total e mineral (a) e entre matéria orgânica e nitrogênio total (b) no solo em experimentos conduzidos há mais de 20 anos em Eldorado do Sul (PVd: 0-10 cm)	48
14. Relações entre o teor de fósforo (a) e potássio disponíveis (b) no solo e sua concentração no tecido vegetal e entre essas e o rendimento relativo de grãos de soja (c) e (d) em lavouras cultivadas no SPD no Planalto Médio [LVd: 0-10 cm; (c) $\text{pH} \geq 5,5$; $V \geq 65\%$ e $K \geq 60 \text{ mg dm}^{-3}$; (d) $\text{pH} \geq 5,5$; $V \geq 65\%$ e $P \geq 6 \text{ mg dm}^{-3}$]....	49
15. Relações entre indicadores da fertilidade do solo e rendimento relativo de grãos de soja em lavouras cultivadas no SPD no Planalto Médio do RS (LVd: 0-10 e 0-20 cm).....	51
16. Curvas de calibração para fósforo extraível pelo método Carolina do Norte no solo cultivado no SC (Mielniczuk et al., 1969).....	54
17. Curvas de calibração para fósforo disponível — Mehlich 1 (a) e resina (b) — em solos cultivados no SPD [Adaptado de Schlindwein (2003) com as faixas de interpretação adotadas pela CQFS RS/SC (2004)].....	56
18. Relações entre os principais indicadores da fertilidade do solo e o rendimento de grãos de milho avaliados em experimentos com diferentes históricos de cultivo, conduzidos há mais de 20 anos em Eldorado do Sul (PVd: 0-10 cm).....	58
19. Relações entre outros indicadores da fertilidade do solo e o rendimento de grãos de milho avaliados em experimentos com diferentes históricos de cultivo, conduzidos há mais de 20 anos em Eldorado do Sul (PVd: 0-10 cm).....	59
20. Evolução do rendimento de grãos de milho cultivado em solo com diferentes históricos de cultivo em Eldorado do Sul entre 1985 e 2005 [resultados de 1985 a 2003: Zanatta (2006)]	62
21. Evolução dos principais indicadores da fertilidade de solo e do rendimento de grãos de soja cultivada no SC T/S (a), no SPD T/S (b) e no SPD T/S/A+Tv/M/Cz/S (c) em Santo Ângelo entre 1979 e 2004 (LVdf: 0-10 cm).....	63

22.	Evolução dos principais indicadores da fertilidade e do rendimento de grãos de soja cultivada no SC (a), no CM (b) e no SPD (c), com a rotação S/Cv/S/V/Sg/Ab, em Passo Fundo entre 1985 e 2005 (LVd: 0-20 cm).....	64
23.	Evolução do rendimento de grãos de soja em diferentes sistemas de cultivo e da precipitação pluvial anual em Passo Fundo entre 1985 e 2005 (Denardin & Kochhann, 2006 – comunicação pessoal).	65
24.	Representação integrada (%) do rendimento de grãos de milho com os primeiros indicadores da fertilidade de solo utilizados no RS — pH em água, fósforo e potássio disponíveis e matéria orgânica — avaliados em experimentos com diferentes históricos de cultivo [(a) 0 e (b) 180 kg ha ⁻¹ de N], conduzidos há mais de 20 anos em Eldorado do Sul (PVd: 0-10 cm; referência: 100% = SC A/M).....	67
25.	Representação integrada (%) do rendimento de grãos de milho com os indicadores da fertilidade do solo agregados aos primeiros utilizados no RS — alumínio, cálcio e magnésio trocáveis, saturação por bases e por alumínio e CTC efetiva — em experimentos com diferentes históricos de cultivo [(a) 0 e (b) 180 kg ha ⁻¹ de N], conduzidos há mais de 20 anos em Eldorado do Sul (PVd: 0-10 cm; referência: 100% = SC A/M; *m/5 e Al/25; **m/4 e Al/4)	68
26.	Representação integrada (%) do rendimento de grãos de milho com os indicadores da fertilidade do solo mais sensíveis — fósforo disponível, magnésio trocável, nitrogênio total, matéria orgânica, CTC efetiva e umidade — em expressar a mudança no sistema de cultivo em experimentos conduzidos há mais de 20 anos em Eldorado do Sul [(a) 0 e (b) 180 kg ha ⁻¹ de N; PVd: 0-10 cm; referência: 100% = SC A/M].....	70
27.	Representação integrada (%) dos indicadores da fertilidade do solo — fósforo disponível, magnésio trocável, nitrogênio total, matéria orgânica, CTC efetiva e umidade — para expressar o rendimento de grãos de milho em experimentos conduzidos há mais de 20 anos em Eldorado do Sul (PVd: 0-10 cm; referência: 100% = SC A/M sem N; *rend./4; **P/2).....	71
28.	Relações entre indicadores da fertilidade do solo — pH em água, fósforo e potássio disponíveis, alumínio trocável, matéria orgânica, saturação por bases e por alumínio — e o rendimento de grãos das culturas normalizados conforme as condições avaliadas em cada local, Eldorado do Sul (a), Passo Fundo (b) e Santo Ângelo (c) [Al e m invertidos; (a) e (c): 0-10 cm; (b): 0-20 cm].	74
29.	Relações entre indicadores da fertilidade do solo — pH em água, fósforo e potássio disponíveis, alumínio trocável, matéria orgânica, saturação por bases e por alumínio — normalizados e rendimento relativo de grãos calculado conforme as condições avaliadas em cada local, Eldorado do Sul (a), Passo Fundo (b) e Santo Ângelo (c) [Al e m invertidos; (a) e (c): 0-10 cm; (b): 0-20 cm].	76

30.	Relações entre indicadores da fertilidade do solo — pH em água, fósforo e potássio disponíveis, alumínio trocável, matéria orgânica, saturação por bases e por alumínio — e o rendimento de grãos normalizados [Teste 1: (a)] e com os indicadores normalizados com padrões semelhantes e rendimento relativo de grãos [Teste 2: (b)], em Eldorado do Sul, Passo Fundo e Santo Ângelo juntos [Al e m invertidos; (a) e (c): 0-10 cm; (b): 0-20 cm]..	77
31.	Principais noções da fertilidade do solo e análise da noção atual, interpretados de maneira análoga à evolução dos sistemas abertos [idéias defendidas por grupos que discutem a noção: “e ₁ ”: mineralista; “e ₂ ”: dúvidas; “e ₃ ”: divide a fertilidade; “e ₄ ”: nova; adaptado de Prigogine (1996)].....	82
32.	Principais sistemas e subsistemas que interagem com o sistema solo	91
33.	Relação entre o aumento do grau de complexidade do solo formado e da sua fertilidade pelas interações entre o clima, a rocha matriz e a vida no tempo.....	93
34.	Fertilidade: uma propriedade emergente da interação entre os subsistemas estrutural e renovável do sistema solo.....	97
35.	Produtividade: uma propriedade emergente da interação entre o subsistema planta, o sistema vida e um ambiente específico.....	98
36.	Principais interações que possibilitam a continuidade da agricultura.	99
37.	Representação integrada (%) do rendimento de grãos de milho com indicadores das condições químicas, físicas e biológicas do sistema solo avaliados aos 15 anos do experimento conduzido em Eldorado do Sul, nas parcelas com 180 kg ha ⁻¹ de N [PVd: umidade, COT e CO: 0-10 cm; CO ₂ e EA: 0-7,5 cm; C microbiano e C-CO ₂ : 0-5 cm; referência: 100% = SC A/M sem N; adaptado de Conceição (2002)].....	101
38.	Representação integrada (%) do rendimento de grãos de milho com indicadores biológicos do sistema solo no SPD com diferentes rotações de culturas, avaliados aos 19 anos do experimento conduzido em Eldorado do Sul, nas parcelas com 180 kg ha ⁻¹ de N [PVd: 0-10 cm; referência: 100% = R; adaptado de Schmitz (2003)].....	101

RELAÇÃO DE ABREVIATURAS

Abreviaturas	Sistemas de cultivo, espécies cultivadas e indicadores tradicionais de fertilidade do solo	
	Sistemas de cultivo	
R	Repouso ou pousio	
SC	Sistema convencional	
SPD	Sistema plantio direto	
CM	Cultivo mínimo	
	Espécies cultivadas	
	Nome comum	Nome científico
A	Aveia preta	<i>Avena strigosa</i>
Ab	Aveia branca	<i>Avena sativa</i>
Az	Azevém	<i>Lolium multiflorum</i>
C	Caupi	<i>Vigna unguiculata</i>
Cv	Cevada	<i>Hordeum vulgare</i>
Cz	Colza ou canola	<i>Brassica napus</i>
V	Ervilhaca ou vica	<i>Vicia sativa</i>
G	Guandu	<i>Cajanus cajan</i>
L	Lablab	<i>Lablab purpureus</i>
M	Milho	<i>Zea mays</i>
N	Nabo	<i>Raphanus sativus</i>
S	Soja	<i>Glycine max</i>
Sg	Sorgo	<i>Sorghum vulgare</i>
Tç	Tremoço	<i>Lupinus albus</i> (br) <i>Lupinus sativus</i> (verm)
Tv	Trevo	<i>Trifolium subterraneum</i>
T	Trigo	<i>Triticum aestivum</i>
P	Pangola	<i>Digitaria decumbens</i>
	Indicadores de fertilidade do solo	
Al	Alumínio	
Ca	Cálcio	
P	Fósforo	
Mg	Magnésio	
MO	Matéria orgânica	
N	Nitrogênio	
K	Potássio	
m	Saturação por alumínio	
V	Saturação por bases	

RELAÇÃO DE APÊNDICES

	Página
01. Evolução da fertilidade em solos do Planalto do RS (Material e métodos)	117
02. Avaliações feitas nos experimentos de coberturas e de preparos de solo na Estação Experimental Agronômica da UFRGS em Eldorado do Sul (Material e métodos).....	119
03. Avaliação da fertilidade do solo, da concentração de nutrientes no tecido de plantas e do rendimento de grãos da soja em lavouras conduzidas no SPD no Planalto Médio do RS (Material e métodos).....	124
04. Avaliações feitas no experimento de uso e manejo e conservação do solo na COTRISA em Santo Ângelo (Material e métodos).....	127
05. Avaliações feitas no experimento de sistemas de preparo de solo na EMBRAPA - Trigo em Passo Fundo (Material e métodos).....	129
06. Valores do rendimento de grãos e dos indicadores de fertilidade do solo relativos ao SC A/M avaliados na safra 2005/06 em experimentos de Eldorado do Sul (PVd: 0-10 cm).	131
07. Resultados dos experimentos de Eldorado do Sul, Passo Fundo e Santo Ângelo utilizados para testar capacidade da técnica de normalização para expressar níveis da fertilidade nos solos.....	132
08. Principais contribuições para a compreensão dos sistemas abertos.....	136

1. INTRODUÇÃO

O homem percebeu, na Antiguidade, antes de inventar a agricultura, que a produção de alimentos dependia da fertilidade do solo. Por isso, pode ter desenvolvido uma noção de fertilidade do solo muito antes do conceito de solo. As principais contribuições relativas à história da noção da fertilidade são apresentadas neste trabalho — da primeira teoria da fertilidade proposta por Columella (42 d.C.), que sintetizou e aprimorou o conhecimento construído na Antiguidade, à teoria mineralista, construída por Liebig (1842) sob os fundamentos da nutrição mineral propostos por Saussure (1804). Com base na teoria mineralista, em que os elementos minerais (nutrientes) solúveis são o alimento das plantas, formou-se, no século XIX, o conceito de fertilidade do solo amplamente utilizado no mundo. Menos de meio século após a euforia, gerada pelas conseqüências da aplicação desse conceito — promoveu extraordinário progresso na agricultura e aumento na produção de alimentos — muitos pesquisadores começaram a manifestar sua insatisfação com ele, por ser restrito apenas às condições químicas do solo. No século XX, a insatisfação aumentou e surgiram percepções mais claras sobre a fertilidade, porém, o conceito tradicional — fornecer nutrientes e manter a ausência de elementos tóxicos às plantas — continua sendo amplamente utilizado, inclusive no Brasil. Com base nesse conceito, a fertilidade é avaliada pela determinação de indicadores químicos em amostras de solo, e fertilizantes, adubos (minerais ou orgânicos) e corretivos (de acidez ou de alcalinidade) são recomendados para a sua melhoria. Apesar dos benefícios da aplicação desse conceito no aumento da fertilidade dos solos e na produtividade das culturas, se verifica, na prática, que a avaliação e, conseqüentemente, o conceito tradicional podem não ser suficientes para expressar a fertilidade do solo percebida pelas plantas, principalmente nos solos cultivados por longo tempo no sistema plantio direto. A insuficiência desse conceito, percebida na teoria desde o final de século XIX e, na prática, no início do século XXI, indica ser este um momento de mudança na percepção da fertilidade do solo, da qual, provavelmente, resultará um novo

conceito dessa propriedade do solo, essencial para a vida das plantas. É provável que o novo conceito não se restrinja à química do solo, mas a expresse como uma propriedade emergente da interação entre todas as condições dadas pelo sistema solo para o desenvolvimento e a produtividade das plantas. Com o novo conceito, deverá ser definido um novo processo de avaliação e deverão ser recomendadas outras práticas, além da aplicação de adubos e corretivos, para aumentar e manter a fertilidade do sistema solo.

A hipótese da tese é que o conceito mineralista, tradicional e amplamente utilizado e, conseqüentemente, a sua avaliação, restrita ao aspecto químico, são insuficientes para expressar a fertilidade do solo percebida pelas plantas; por isso o momento atual é propício ao surgimento de uma nova noção da fertilidade do solo, com um novo conceito e avaliação. Os objetivos são: 1) conhecer como evoluiu a noção da fertilidade do solo até a formação do conceito atual; 2) avaliar os efeitos da aplicação desse conceito tradicional na mudança da fertilidade e na evolução do uso agrícola dos solos do Planalto do Rio Grande do Sul; 3) avaliar a capacidade do conceito tradicional em expressar a fertilidade do solo percebida pelas plantas, pela comparação dos resultados obtidos na sua avaliação tradicional, com a produtividade das culturas em solos com diferentes históricos de cultivo, e pela magnitude do “ruído” nas etapas do processo de avaliação; 4) identificar se existem elementos suficientes para promover a mudança no conceito da fertilidade do solo, pela interpretação das percepções que marcaram a evolução da noção de fertilidade e pela análise do momento atual segundo à evolução dos sistemas abertos; 5) refletir sobre como seria o novo conceito, se o solo fosse considerado um sistema aberto e a fertilidade uma propriedade emergente do funcionamento do sistema solo.

2. A AGRICULTURA E A NOÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO

O início da percepção da fertilidade do solo pelo homem ocorreu quando a abundância de frutos começou a diminuir e esse procurou, na mudança de local, terra sempre mais adequada a maiores colheitas. Essa percepção foi aprimorada com o início, a prática e a própria evolução da agricultura. O homem se empenhou em conferir ao solo características adequadas para a maior e melhor produção de alimentos e formou um conceito de fertilidade muito antes de um conceito de solo. Assim, a evolução da agricultura e das civilizações tornou-se inseparável da noção de fertilidade do solo. Desde a primeira teoria da fertilidade do solo, proposta por Columella em 42 d.C., até os dias de hoje, houve mudanças importantes na sua noção, na sua avaliação e nas práticas utilizadas para regenerá-la. Uma visão geral das principais contribuições que construíram essa história é apresentada a seguir. Inicia-se com a noção ampla de fertilidade na Antigüidade e percorre-se o tempo até chegar àquela restrita à química, da atualidade (Idade Contemporânea). São também abordadas a evolução do conceito no Brasil e a insatisfação com este conceito tradicional usado para expressar a fertilidade do solo; essa insatisfação, que começou a surgir no final do século XIX, tornou-se mais intensa no século XX e é percebida inclusive no Brasil.

2.1 A agricultura e sua evolução

Os produtos espontâneos da terra eram suficientes para a alimentação do animal e do homem selvagem, mas não o são para o homem civilizado, que satisfaz suas necessidades básicas com os produtos que obtém da terra com inteligência e trabalho (Scarponi, 1949). Assim se identificavam civilização e agricultura; esta, à época romana, definida por Varrone como ciência e arte (Saltini, 1984a). Atualmente, a agricultura é definida como a arte de cultivar plantas; a pecuária como a arte de criar animais no campo; e a agropecuária, o desenvolvimento conjunto dessas atividades (Wikipédia, 2006).

A humanidade e a agricultura evoluíram juntas. Nos períodos Paleolítico e Mesolítico, o homem era nômade e vivia da caça, da pesca e da coleta de frutos e de raízes; no Neolítico, começou a cultivar plantas e a criar animais, evitando assim as buscas freqüentes e perigosas por alimentos. Nesse período, há 12 mil anos, surgiu a agricultura, pela primeira vez, com os sumérios na Mesopotâmia, localizada na “meia-lua fértil” do Antigo Oriente, na parte alta dos rios Tigre e Eufrates. No início, a agricultura era praticada pelas mulheres; só depois de muito tempo os homens, responsáveis pela caça e o pastoreio itinerante, se dedicaram ao cultivo do solo nas margens dos rios. A agricultura mudou a vida das pessoas, e o homem, com a abundância de alimentos, fixou-se ao local com a construção de casas, de celeiros, de ferramentas, como arados e ceifadeiras, e passou a trabalhar com cerâmica e tecelagem. Assim, formaram-se as primeiras aldeias (Rodrigues, 2005).

À medida que a agricultura se expandiu, houve a procura por terras férteis, caracterizando a revolução agrícola e o Neolítico. O excesso de alimentos produzidos pela agricultura irrigada, permitiu que o homem desenvolvesse outras necessidades. Isso fez com que a economia das Civilizações Egípcia, Grega e Romana fosse baseada principalmente na agricultura. Entretanto, sua evolução praticamente se estagnou na Idade Média, pois continuavam a utilizar técnicas rudimentares e a obter baixas produtividades. Na Idade Moderna, voltou a se desenvolver, impulsionada pelas novas descobertas científicas, com melhoria das técnicas de cultivo, aumento de produtividade e maior variedade de espécies cultivadas. Na Idade Contemporânea, a agricultura se desenvolveu mais ainda com o aumento na produção de alimentos, especialmente após as guerras mundiais (Saltini, 1984a).

Na América, a agricultura surgiu de forma independente. No período Paleoíndio, os povos eram caçadores, nômades e alimentavam-se da coleta de frutos e raízes; no Arcaico, intensificaram a exploração dos recursos aquáticos e começaram a adotar formas sistemáticas de coleta das plantas e a cultivá-las. Os Maias iniciaram a agricultura cultivando abóbora, milho e feijão. Mais tarde, passaram a cultivar batata, cacau, mandioca e girassol e a utilizar técnicas como irrigação, cultivo em terraços escalonados e adubação do solo. A agricultura dos Incas, na Cordilheira dos Andes, era muito desenvolvida com o cultivo de feijão, milho e batata em terraços, utilizando canais de irrigação. No

período Clássico, a população vivia fora dos grandes centros, em aldeias dedicadas quase exclusivamente à agricultura (Pons, 1998).

A agricultura antiga é caracterizada pelo uso intensivo da força humana e animal, por técnicas e utensílios agrícolas rudimentares, como enxada, arado de tração animal, queimadas e obtenção de colheitas irregulares. A agricultura moderna é amparada pelo desenvolvimento do conhecimento científico, pelo uso de novos tratamentos culturais, de tratores, de colhedoras, de semeadoras e de outros implementos agrícolas, que resultaram em aumento da produtividade agrícola e maior regularidade das colheitas. A agricultura contemporânea é baseada em tecnologia e busca o equilíbrio entre a produção eficiente de alimentos saudáveis em menor área disponível com menor deterioração do ambiente (Mazoyer & Roudart, 2001).

Múltiplos equilíbrios se estabelecem no mundo da agricultura entre os homens e a terra, com a mudança das espécies cultivadas, das condições geográficas e climáticas, da situação econômica, da cultura e do conhecimento científico à disposição da sociedade, nas diferentes épocas. Cada atividade agrícola é resultante das relações entre forças naturais e elementos das civilizações em cada fase evolutiva. A construção do conhecimento é o “centro vital” da Ciência Agrônoma. Na sua evolução, destaca-se a contraposição entre o conhecimento pré-científico ou mitológico e o científico ou experimental. Os hábitos antigos, que permanecem entre as práticas agrícolas, permitem tratar a agricultura como uma arte velha e ao mesmo tempo uma ciência nova, fundamentada sobre os preceitos dos antigos geopônicos¹, que começaram a construir a Ciência Agrônoma (Saltini, 1984a).

2.2 A noção da fertilidade do solo

A história da noção da fertilidade do solo, a seguir apresentada, foi elaborada com base, principalmente, na obra “História das Ciências Agrícolas”, que descreve as principais mudanças que interferiram na agricultura desde a Antiguidade até 1900, publicada em quatro volumes por Saltini, em 1984 (Saltini 1984a, 1984b, 1984c e 1984d). Por isso, sempre que as informações aqui relatadas forem baseadas na obra de Saltini, a fonte não será citada e quando for de outros autores, as referências serão incluídas no texto.

¹ Pessoas que escreviam sobre a agricultura.

Na Antigüidade, os geopônicos e os geórgicos² já escreviam sobre a “fertilidade da terra”, mas somente depois do ano 1000 d.C. são encontradas referências à “fertilidade do solo”. As palavras “solo” e “terra” eram usadas, muitas vezes, como sinônimos, na China, há aproximadamente 4.000 anos, significavam meio de suporte e nutrimento para o desenvolvimento das plantas e para a produção de alimentos. A palavra “terra” (português; latim: *terrae*) tem origem, dos quatro elementos de Aristóteles, do vocábulo grego *geo*. Mais tarde, foi criado vocábulo grego *ped* ou *pedon* para expressar terra onde se pisa. Para diferenciar *geo* de sentido amplo, Teofrasto criou o vocábulo *edaphos* (grego; latim: *solum*; português: *solo*) para expressar, em sentido restrito, a camada superficial da terra dotada de *humore* (grego: “sangue” que flui na terra; latim: *humus*; português: húmus) que nutre as raízes das plantas. Neste trabalho, será preservada a terminologia usada pelos escritores das noções de fertilidade no texto consultado, assim os termos “fertilidade da terra” e “fertilidade do solo” serão considerados sinônimos.

O vocábulo *humus* (latim) também era utilizado para expressar terra cultivada, aquela que transformou o homem selvagem em civilizado. Por isso, o vocábulo *humanitas* (latim; português: *humanidade*) expressava o conjunto de pensamentos, de ações, de sabedoria e de amor, que possibilitou alterar e manter a transformação que mudou o destino dos *humanus* (latim; português: *humanos*) (Enciclopédia Agrária Italiana, 1952). A vida é sustentada fundamentalmente pelo requisito da fertilidade, idêntica à feracidade e à fecundidade da terra. Devido a isso, a evolução da agricultura e das civilizações é inseparável do conhecimento da fertilidade do solo nas diferentes fases históricas (Scarponi, 1949).

2.2.1 Evolução da noção da fertilidade do solo: uma visão geral

O interesse do homem pela fertilidade da terra sempre foi movido, primeiro, pela necessidade de se alimentar para se manter vivo e, segundo, pela ânsia de prosperar com o lucro obtido com os produtos agrícolas. Por isso, iniciou o cultivo e se empenhou em conferir ao solo características adequadas para maior e melhor produção de alimentos formando e alterando aos poucos o conceito de fertilidade (Oliva, 1939).

² Pessoas que trabalhavam com agricultura. Georgófilos: pessoas que gostavam da agricultura, cultores dos estudos agrícolas.

Uma noção ou um conceito de fertilidade do solo, em determinada época, é formado pela interação dos mecanismos do sistema neuronal do homem com os mecanismos do solo e é influenciado pela cultura, pelo conhecimento e pela tecnologia disponível. Quanto mais intensa essa interação, mais real é o conceito. Assim, a fertilidade que emerge daquele solo, influenciada pelas práticas agrícolas derivadas da noção do homem mais evoluída da fertilidade, torna-se cada vez mais alta. Por isso, a história da noção da fertilidade é a expressão da interação entre a consciência do homem e o solo, ou seja, seu entendimento de solo e a resposta deste às suas ações, nas diferentes épocas. A formação de um conceito de fertilidade ocorre quando o homem pensa, gera uma atividade mental sobre a fertilidade e sobre o funcionamento do solo e associa a relação entre ambos com as plantas. Embora seja uma propriedade do solo que se manifesta em função das plantas cultivadas, é a atitude do homem em relação a ela que desencadeia o grau de expressão da fertilidade.

2.2.1.1 Na Antigüidade

Na Antigüidade, a sobrevivência do homem era dependente dos produtos da terra, por isso o cultivo das plantas, à medida que a escassez de alimentos aumentou, passou a ser a razão da sua vida. Ao observar que as plantas se nutriam da terra, o homem atribuiu a esta a “função de nutrimento” das plantas, comparando-a à mãe que precisa se nutrir para melhor desempenhar a sua função. Por isso, passou a nutri-la com esterco e a cultivá-la com plantas a ela benéficas (Scarponi, 1949). Essa primeira concepção da fertilidade foi encontrada nos escritos dos filósofos e geórgicos gregos (Aristóteles e Teofrasto) e nos escritores e poetas latinos (Catone, Varrone, Virgílio, Lucrécio, Columella e Plínio); estes inspirados na obra do pai da Ciência Agrônômica, o cartaginês Magone (IV ao III século a.C.). Por ser a agricultura considerada a única atividade manual digna de um homem livre naquela época (Sócrates, 470 a 399 a.C.), era fundamental entender e melhorar a fertilidade da terra. Surgiram então importantes indicações para se obter colheitas abundantes, muitas dessas utilizadas ainda hoje. Dentre as práticas agrícolas, destacavam-se a necessidade de arar bem (Hesíodo no VII século a.C.; Catone, 234 a 149 a.C.) e adubar a terra (Xenofonte, 430 a 354

a.C.; Aristóteles, 384 a 322 a.C.; Catone, 234 a 149 a.C.); o modo de prepará-la e a semeadura dos cereais (Teofrasto, 378 a 287 a.C.); e intercalar períodos de repouso da terra (Bíblia) ou fazer rotação com legumes no cultivo do trigo (Lucrecio, 98 a 55 a.C.).

As recomendações para melhorar a fertilidade da terra resultaram da constatação de que as plantas, quando cultivadas no mesmo solo por muito tempo, produziam cada vez menos. Portanto, quatro práticas dentre aquelas recomendadas solucionavam ou diminuíaam o problema observado. Como a agricultura mais avançada na época era desenvolvida em clima temperado, o ato de arar o solo era, possivelmente, o primeiro e o mais importante. Estimulava o aquecimento do solo, aumentava a aeração, facilitava a semeadura, armazenava mais água e controlava as plantas concorrentes. A outra prática, muito comum por longo período na história da agricultura, foi o repouso. Como a única alternativa era colocar esterco e essa prática dependia da existência deste, a solução era deixar o solo em repouso. Na agricultura mais avançada, possivelmente, esse mesmo solo era cultivado com legumes.

As percepções sobre a agricultura de antes da era Cristã (a.C.) foram aprimoradas e deram forma à primeira teoria da fertilidade da terra proposta por Columella, publicada na “A arte da agricultura” (42 d.C.). Esta obra representa a maturidade da Ciência Agrônômica da Antigüidade. Em suas observações, verificou que a diminuição na produção dos alimentos não era devido ao envelhecimento ou cansaço da terra, mas sim à exploração excessiva da fertilidade. Retirava-se muito (hoje identificados como nutrientes) e repunha-se pouco. Columella conceituou a fertilidade como uma capacidade continuamente renovável, garantida pelo cultivo da terra com técnicas apropriadas e adubação abundante. Esse conceito, válido atualmente, é a base do sistema de recomendação de fertilizantes. Além da adubação, instrumento fundamental para regenerar a fertilidade, destacou, na sua teoria, a importância de arar bem e defendeu o cultivo de plantas à benefício da terra (atualmente denominada adubação verde), quando feito com leguminosas, enriquece a terra. Por essas práticas constata-se que a química, a física e a biologia do solo eram consideradas no seu conceito de fertilidade. A percepção de Columella sobre a fertilidade era muito evoluída e serviu de base para as pessoas tirarem seu sustento da terra por quase dois milênios.

Columella percebia que a fertilidade era diferente de uma terra para outra, por isso, deveria ser avaliada para verificar se continha um suco natural, uma gordura e um fermento. A consistência e o sabor da terra e o tipo de vegetação espontânea na área também deveriam ser analisados. Desde a Antigüidade, as pessoas relacionavam a cor do solo com a produtividade das plantas. Para Columella, no entanto, a cor não era indicador de fertilidade. A percepção dele era correta, pois solos mais escuros podem ter mais matéria orgânica, mas podem também ser menos drenados o que lhes confere cor mais escura se houver muito ferro. Além disso, é possível solos terem coloração escura, devido à matéria orgânica, mas serem de baixa produtividade devido à alta acidez ou outro fator.

2.2.1.2 Na idade Média

Após a publicação de Columella, a obra mais importante foi publicada somente no século XII por um árabe, Ibn al Awam, também centrada na fertilidade do solo. Segundo ele, o solo se forma pelo intemperismo das rochas promovido pela ação dos agentes meteorológicos. Somente depois da ação do intemperismo, o solo passa a ter fertilidade, ou seja, os compostos minerais tornam-se aptos para nutrir as plantas. As propriedades da fertilidade — permeabilidade, capacidade de retenção de água e tenacidade — dependem da proporção das partículas de areia, silte e argila na composição do solo (textura). Trata-se de uma noção decorrente da percepção da ação do intemperismo em relação à química, mas que enfatiza também a face física da fertilidade. O árabe destacou também que era importante conhecer as afinidades e as incompatibilidades entre o tipo de solo e as plantas cultivadas. Esse conhecimento continua válido, pois um solo é fértil para uma determinada espécie e pode não ser para outra. A noção de Ibn al Awam, que re-propôs o conceito de fertilidade de Columella, é semelhante à atual. Nela, subentende-se a necessidade de uma ação externa (intemperismo) para solubilizar os minerais e tornar o solo fértil, ou seja, somente os minerais numa forma disponível nutrem ou possibilitam o desenvolvimento das plantas, embora não se referisse especificamente a nutrientes.

2.2.1.3 Da Idade Moderna à Contemporânea

O estímulo ao início da ciência experimental moderna e à renovação da Ciência Agrônômica foi dado por Herrera (1513), depois por Gallo (entre 1550 e 1572) e por Serres (1600). Nesse período, era premente o aumento da produção de alimentos. Segundo Gallo, o aumento da produção só era possível com o estabelecimento da agricultura intensiva; por isso, era necessário diminuir os períodos de repouso e aumentar a fertilidade do solo alternando, na rotação, espécies melhoradoras e exploradoras. É possível perceber que, à época, havia poucas alternativas para aumentar a fertilidade do solo.

Nessa mesma época, Tarello (1567) difundiu um sistema de rotação de culturas que, no entender dele, transformaria a terra quase estéril em fértil e tornaria a fértil, repousada, adubada e bem trabalhada, em muito mais fértil a cada dia. Nesse sistema, uma parte da área cultivada com trigo seria cultivada com trevo para a pastagem dos animais. Assim, a produção de esterco aumentaria e possibilitaria aplicar quantidades maiores de esterco na cultura do trigo. Isso aumentaria a sua produtividade, permitindo o uso de parte da área para a produção de carne e enriquecimento do solo com nitrogênio através da cultura trevo. Esses aspectos, talvez não fossem do conhecimento de Tarello.

No século XVI, a fertilidade continuava sendo entendida como o “nutrimento que as plantas pegam da terra”. No entanto, foi a partir dessa época que a investigação mudou de foco, do entendimento da fertilidade e das práticas para regenerá-la, para o detalhamento do nutrimento, do alimento ou da substância vital para as plantas. Nessa época, a técnica experimental marcou o limite entre o modo empírico de investigação e o indutivo. Essa técnica possibilitou aos pesquisadores separar e identificar compostos, desenvolver equipamentos e gerar tecnologias que foram fundamentais para a renovação do conhecimento agrônômico e para o progresso da agricultura.

A busca por uma substância, que sozinha fosse responsável pela vida das plantas, durou do século XVI ao século XVIII. Entre alguns resultados interessantes, está a afirmação de Bacon (1561 a 1626) e van Helmont (1577 a 1644) de que as plantas retiravam um suco da terra e a água era o principal alimento delas. Em seguida, Weston (1650) identificou, entre os fatores de fertilidade, os sais nítricos como fundamentais na nutrição das plantas, enquanto Glauber (1656) afirmava ser o salitre o alimento das plantas, podendo,

inclusive, substituir o esterco para recuperar a fertilidade do solo. Contemporâneo desses, Boyle (1661) insistia na água como alimento principal associada ao ar, embora percebesse pequena contribuição dos sais solúveis.

Somente após os experimentos de Woodward (1699), a água deixou de ser entendida como o alimento das plantas. Com base na relação entre a impureza da água e o vigor das plantas, esse pesquisador concluiu que eram as minúsculas partículas de terra, transportadas pela água, o alimento delas. Essa idéia continuou sendo defendida por Tull (1731), por Duhamel (1750) e por Home (1757); este acrescentou ser necessário um princípio ativo para elas agirem, pois constituíam a menor parte das plantas. Evidentemente, à época, essa afirmação não parecia um despropósito. Hoje, ultrapassaria os limites do ridículo, por afirmar que as plantas, literalmente, ingeriam partículas de solo. Em 1757 a análise química do solo foi utilizada, pela primeira vez, por Home, para entender a nutrição das plantas; isto melhorou o entendimento da fertilidade.

A teoria humista da fertilidade teve origem nas observações de Wallerius (1761), que identificou o húmus como o alimento das plantas. A fertilidade era diretamente dependente do seu conteúdo na terra. Isso, de fato, era o retorno às noções da Antigüidade, já combatidas por Columella (42 d.C.), que defendia não haver relação direta entre a produtividade e a cor do solo (representada à época pelo maior conteúdo de húmus).

No período compreendido entre o final do século XVIII e o início do século XIX, pouco se avançou em termos de um conceito claro sobre a fertilidade, mas havia discussão sobre as práticas para regenerá-la. Tull (1731), por exemplo, defendia que a rotação de culturas não era necessária, já Rozier (1781) insistia nela, com a inclusão de algumas espécies com capacidade de explorar o solo em maior profundidade, e na adubação natural que resultava de seus resíduos na superfície, como técnicas para melhorar a fertilidade do solo. A alternativa de recuperar a fertilidade pelo repouso do solo (Young, 1784) já não se sustentava mais devido à necessidade cada vez maior de alimentos. Nesse período, há a coincidência do início da, assim chamada, revolução industrial na Inglaterra. No final do século, Mitterpacher (1794) explicou que os instrumentos para a regeneração da fertilidade eram a adubação e a rotação de culturas e não o repouso. Este degrada a terra ao invés de melhorá-la, pois ela não reabsorve do ar os sais e os sucos consumidos e exportados das

plantas. Não só pela insistência de Mitterpacher, mas também, obviamente, por outros fatores (sendo o mais importante, a necessidade de alimentos devido ao crescimento exponencial da população), o repouso deixou de ser utilizado como prática para recuperar a fertilidade do solo.

É no século XIX que os estudos em solo e fertilidade se desenvolvem com maior intensidade. A percepção por Thaer (1812), de que a fertilidade é uma grandeza essencial para estimar a capacidade produtiva do solo, permitiu o desenvolvimento de um método para a avaliação da evolução da fertilidade residual ao final de um ciclo de rotação. Provavelmente esse foi um dos primeiros métodos de avaliação da fertilidade, após o de Columella; proposto com base na análise das proporções entre a fertilidade exportada — dependia da espécie cultivada e sua produção — e a fertilidade restituída ao solo, pela aplicação de adubos e de corretivos e pelo cultivo de espécies melhoradoras. Por ser defensor da teoria humista e por não conhecer o trabalho de Saussure (1804), Thaer (1812), assim como Davy (1813), não propôs metodologia com identificação de substâncias químicas para avaliá-la.

Nessa época, Davy (1813) conceituou o solo, pela primeira vez, como uma mistura de elementos químicos e físicos diversos, constituído principalmente por substância mineral derivada da decomposição das rochas. Esse conceito se assemelha à percepção do solo e da fertilidade de Ibn al Awam. É possível que este concluísse da mesma forma, se tivesse disponível, no século XII, as ferramentas científico-tecnológicas do início do século XIX. Enquanto Davy indicava que, pela composição do solo, havia a probabilidade de as plantas se alimentarem de diversos elementos, Carradori (1814) retornava à Antigüidade, conceituando a fertilidade como a capacidade da terra em nutrir as plantas em abundância para um bom nutrimento.

Os princípios fundamentais da nutrição mineral das plantas foram enunciados, pela primeira vez, por Saussure (1804). Em seus experimentos, comprovou que o alimento das plantas não era o húmus em si, mas os sais minerais solúveis contidos nele e detalhou a absorção dos nutrientes pelas plantas. Assim, deu forma ao conceito moderno em que a fertilidade depende da disponibilidade dos elementos solúveis no solo e pode ser regenerada com a adição desses mesmos elementos ou de substâncias capazes de liberá-los na forma solúvel. Esse conceito é uma versão detalhada da noção de

Columella, re-proposta por Ibn al Awam (século XII), Gallo (1550-1572), Serres (1600) e Carradori (1814). A ação e os efeitos dos elementos que Saussure identificou são os mesmos da época de Columella. A principal diferença é que, na época de Saussure, havia instrumentos que tornaram possível delinear experimentos com rigor científico para testar a sua intuição. De posse de um conhecimento mais detalhado, foi também possível a Saussure recomendar a adição de substâncias solúveis para regenerar a fertilidade, que deveriam restituir ao solo o que as colheitas exportavam.

A obra de Saussure era muito avançada para a sua época, por isso permaneceu esquecida por quase 40 anos. Foi Liebig (1842) quem transformou duas enunciações de Saussure, “o alimento das plantas são os sais solúveis liberados pelo húmus” e “a necessidade de restituir ao solo os elementos exportados pelas colheitas”, em postulados de extraordinária importância científica na sua teoria mineralista. Na essência, a teoria mineralista diferia da humista, ao preconizar que os nutrientes solúveis eram o alimento das plantas e não o húmus. Embora ambas considerassem a fertilidade como nutrimento das plantas, o novo foco era o alimento das plantas. Esses postulados serviram de base para o desenvolvimento da Ciência Agrônoma moderna. O princípio da restituição, o segundo postulado de Saussure, é o fundamento lógico da adubação na Idade Contemporânea. Assim, a teoria mineralista da fertilidade de Liebig se estabeleceu. Além de reforçar as descobertas de Saussure, demonstrou que alguns nutrientes eram essenciais para o desenvolvimento, mas a proporção dependia da espécie cultivada. Foi a partir dessa época, que a fertilidade passou a ser mensurada, pois concomitantemente se intensificou o desenvolvimento de equipamentos de laboratório. A lei do mínimo — o elemento que estiver presente em menor proporção em relação aos demais deve ser reintegrado por primeiro ao solo — também é atribuída a Liebig.

Liebig transformou a noção de que “a fertilidade é o efeito da riqueza do solo em elementos minerais solúveis” em meta da pesquisa agrônoma e a teoria mineralista promoveu o maior progresso na agricultura da humanidade. Como, na época, o revolvimento do solo era uma prática rotineira, assim como a rotação de culturas na agricultura, as faces física e biológica da fertilidade deixaram de ser enfatizadas e a fertilidade passou a ser tratada, com a teoria mineralista, quase exclusivamente sob seu aspecto químico.

Na metade do século XIX, o nome mais conhecido e prestigiado no meio acadêmico-científico-agrário era o de Liebig, contudo outros pesquisadores também contribuíram para o desenvolvimento em Ciência do Solo e, entre eles, especificamente em fertilidade e nutrição de plantas, estão os nomes de Lawes, Gilbert, Boussingault, Gasparin, Ridolfi e Ville. Lawes (1842) patenteou o processo de fabricação de superfosfato simples, fundou a estação experimental de Rothamsted (1843) e, com Gilbert, verificou que a aplicação de nitrogênio condicionava a eficácia das práticas agrícolas na produtividade das plantas. Contudo, Liebig defendia que a sua aplicação não era necessária e que o fósforo era o primeiro elemento que deveria ser reintegrado ao solo.

As principais contribuições de Boussingault (1843) foram: o início da experimentação a campo para estudar a fertilidade e o desenvolvimento de metodologias de laboratório para análise química do solo, dos adubos e das plantas, permitindo, assim, quantificar os constituintes fundamentais da produção agrícola para o balanço da fertilidade. Gasparin, entre 1843 e 1863, conceituou a fertilidade em relação ao grau de solubilidade dos elementos nutritivos presentes no solo, que as plantas conseguem assimilar (fertilidade potencial em relação aos elementos na forma insolúvel e a atual aos na forma solúvel). Gasparin também aprimorou a metodologia para a quantificação de elementos nas formas solúvel e insolúvel e do nitrogênio e utilizou-a no balanço da fertilidade e na dedução da necessidade de adubação. O trabalho dele possibilitou identificar os elementos essenciais para as plantas e em que proporções deveriam ser utilizados para compor os adubos (Ville, entre 1860 e 1890) e as soluções nutritivas (Sachs e Knop, 1865).

Ridolfi, entre 1843 e 1865, mesmo propondo na sua teoria da fertilidade a aplicação do conhecimento da nutrição das plantas da época e ciente da essencialidade dos nutrientes solúveis na fertilidade, deu a ela um conceito amplo: “é a admirável *atitude* do solo em produzir”. Ridolfi defendeu a alternância de espécies melhoradoras com exploradoras na rotação de culturas para manter a fertilidade. Estas quando cultivadas em benefício do solo se tornariam melhoradoras da fertilidade em diferentes graus, sendo as verdadeiras aquelas que assimilassem muito do ar e pouco do solo, como a alfafa. Sabe-se hoje que as leguminosas têm a capacidade de fixar nitrogênio atmosférico, mas não necessariamente são melhoradoras da fertilidade.

Enquanto Pichat (1865) compartilhava da noção de Ridolfi, Ottavi (1865) anunciou uma percepção inovadora sobre a fertilidade, diferente da expressa por Columella, pelos humistas e pelos mineralistas. Ele identificou, na complexidade, a chave para responder as antigas questões sobre a natureza da fertilidade ao afirmar que as plantas necessitam da complexidade de elementos, tanto no solo quanto nos adubos. Deve ter usado o termo complexidade para se referir à discussão da época sobre o elemento mais importante para a produtividade das plantas e enfatizar que vários nutrientes e em diferentes proporções eram necessários às plantas. Na mesma época, Cantoni (1874) restringiu o conceito da fertilidade à química do solo ao expressar que essa é a capacidade do solo de reter, como filtro eficaz, a maior quantidade de compostos nutritivos em solução. Em 1896, a percepção de que a fertilidade era uma medida relativa, dependente das produções pretendidas do solo nos diferentes locais e que deveria ser avaliada de modo comparativo pela produtividade, foi expressa por Lawes e Gilbert. Eles também repropuseram o princípio da regeneração da fertilidade de Columella, colocando-o como central na revolução agrícola moderna.

A partir da metade do século XIX, a ciência do solo começou a se desenvolver intensamente também na América do Norte, influenciada pelas novas idéias na Europa. Ruffin, entre 1825 e 1845 (Tisdale et al., 1993) foi, provavelmente, o primeiro a usar calcário em solos de regiões úmidas com o objetivo de repor nutrientes removidos pelas plantas e pela lixiviação. Foi na segunda metade do século que iniciaram as estações experimentais americanas e a fabricação de fertilizantes sintéticos, principalmente do superfosfato. No final desse século, dois pesquisadores em Ciência do Solo defendiam duas idéias opostas em fertilidade. Para Whitney, o suprimento de nutrientes do solo era inexaurível e o fator que influenciava o desenvolvimento da planta era a taxa de reposição dos nutrientes para a solução, enquanto Hopkins alegava que isso levaria ao empobrecimento dos solos e ao declínio da produção das culturas. Sua recomendação para o estado de Illinois (USA), após exaustivos estudos, foi a aplicação de calcário e fósforo como a única necessidade dos solos daquele estado (Tisdale et al., 1993).

No século XIX, a agricultura teve um progresso extraordinário estimulado pela mecanização, pelos adubos minerais e pelas novas

tecnologias geradas nas outras ciências. Entretanto a diversidade de opiniões sobre a fertilidade, observada na segunda metade daquele século, demonstra que, mesmo com o sucesso da aplicação da teoria mineralista, nem todos estavam satisfeitos com as noções expressas. Nessa época, na Ciência, surgiram discussões sobre a insuficiência do modelo mecanicista ou cartesiano para entender os fenômenos biológicos. A declaração de Casali (1896), de que um solo é fértil somente se possui na sua constituição determinada quantidade de húmus em relação aos minerais, evidencia a tendência, à época, de reduzir a fertilidade do solo à reposição ou adição de elementos essenciais às plantas. Atualmente, esta noção é muito utilizada, uma teoria humomineralista em vez da mineralista, conforme concebida por Liebig. É uma percepção química da fertilidade, centrada na identificação dos alimentos das plantas, sem considerar as condições físicas e biológicas do solo, que também são fundamentais para o desenvolvimento e produtividade delas.

A incapacidade de explicar a fertilidade dos solos com a noção estabelecida no final do século XIX estimulou os pesquisadores a desenvolver outros conceitos, na primeira metade do século XX. Nesses, percebe-se o retorno à visão de uma fertilidade “inteira”, não restrita ao conteúdo mineral do solo. Nessa época, um modelo sistêmico³ começou a ser adotado para compreender os organismos vivos, principalmente na biologia e na química. Talvez por isso, Cillis (1942) enfatizou que à fertilidade é preciso dar o significado integral de complexo de todas as condições que no solo influenciam a vida e a produtividade das plantas. Para Oliva (1939), a fertilidade é a síntese entre a terra, a atmosfera e as plantas cultivadas, isto é, a harmonia de elementos em cada grau, infinitamente pequeno e infinitamente grande, na vida universal. Embora pretendessem dar à fertilidade um conceito integral, amplo, na prática, quando se depararam com sua complexidade dividiram-na em várias fertilidades para a avaliação. É o caso de Oliva (1939), para quem a fertilidade agrônômica ou integral era composta pela inicial e pela caloria, e a fertilidade atual composta pela fertilidade inicial ou natural, pela caloria ou velha e pela anual ou dinâmica (elementos que circulam no solo durante o ano). Nesse caso, se os mineralistas da segunda metade do século XIX exageraram ao reduzir a fertilidade a elementos químicos, o mesmo fez esse ao dividi-la.

³ Estabelecimento da natureza das relações de um sistema dentro de um contexto (Capra, 1996).

As noções de fertilidade, expressas por alguns cientistas do solo na metade do século XX, indicam uma mudança mais radical na sua percepção, considerando o solo como um sistema⁴ e a fertilidade como uma propriedade desse. Segundo Scarponi (1949), esta é resultante de um sistema de forças múltiplas (biofisiológicas do vegetal, químicas, químico-físicas, pedológicas, hidrológicas, microbiológicas, naturais ou induzidas do solo e as climáticas) em equilíbrio instável num contínuo dinamismo inserido na natureza. Hausmann (1950) complementa o conceito, ao dizer que é uma propriedade dinâmica, resultante de múltiplos processos evolutivos ligados à gênese do solo e é a causa da produtividade das plantas que reside de modo específico no solo. Porém, esses conceitos não prosperaram e o conceito mais mineralista que humomineralista continuou sendo o mais utilizado.

Quatro décadas após Oliva, Casalicchio (1978) conceituou novamente a fertilidade agronômica ou integral como a produtividade de um solo, que reflete a influência combinada de todos os fatores que agem, diretamente ou indiretamente, sobre o crescimento das plantas. Tornou a dividi-la, agora em fertilidades física, biológica e química destacando que a fertilidade química é a capacidade do solo de suprir elementos nutritivos às necessidades das plantas, logo, apenas um aspecto da produtividade do solo. Para Hillel (1980), fertilidade química se refere à quantidade e à variedade das substâncias necessárias para a nutrição das plantas, em formas disponíveis no solo, não excessivamente ácido ou alcalino e livre de agentes tóxicos. Esses conceitos de fertilidade química são semelhantes ao conceito de fertilidade de Foth (1978) — qualidade que permite ao solo prover os elementos em quantidades e proporções adequadas para o crescimento de plantas específicas, quando os outros fatores de crescimento são favoráveis. O conceito adotado pela Soil Science Society of America (1987) de que a fertilidade é a habilidade do solo para fornecer nutrientes essenciais, em quantidades e proporções adequadas, para o crescimento das plantas é a expressão sucinta do conceito químico defendido pelos autores anteriormente citados.

⁴ Um sistema é um todo integrado cujas propriedades essenciais surgem das relações entre as suas partes (Capra, 1996). Um sistema é gerado por um grupo de elementos que interagem sobre um modelo ou padrão de organização para obter uma emergência, qualidade ou propriedade não acessível às partes isoladas.

A maior parte dos pesquisadores conceitua fertilidade para as culturas no geral. No entanto, Sequi (1989), "... garantir para certo grupo de plantas e no limite apenas uma...", indica que para outros grupos de plantas, a mesma condição de fertilidade não se sustenta, e elas podem não ter seu ciclo biológico completado. Observa-se que o autor inclui a planta, ou um grupo de plantas, no conceito tornando-o não universal. Esse fato indica que a planta, que é parte da interação que possibilita a manifestação da fertilidade, também influencia a sua expressão no tempo. Essa percepção, que a planta também participa da formação da fertilidade do solo e/ou que esta é específica à cultura ou a um grupo de culturas, está no conceito de Mazzali (1994), "conjunto das características físicas, químicas e biológicas de um solo capaz de garantir o desenvolvimento da maior parte das culturas...".

No final do século XX, a falta de clareza e de consenso sobre o que é a fertilidade do solo continua, e a busca do entendimento dela em palavras e em atitudes práticas é evidente pelas noções expressas por alguns autores. Por exemplo, Zucconi (1996), assim como fizeram Casalicchio, Oliva e até Gasparin, pela dificuldade de expressar uma única fertilidade, defendeu que no solo há várias fertilidades: a física, a química, a biológica e a ecofisiológica. Logo a seguir, Sims (1999) afirmou que a fertilidade integra os princípios básicos da biologia, da química e da física do solo para desenvolver as práticas necessárias para o manejo dos nutrientes, objetivando a lucratividade e a preservação do ambiente. Se, por um lado, parece mais amplo e não divide a fertilidade, por outro, também este conceito ainda está focado nos nutrientes e não nas condições para o bom desenvolvimento das plantas.

O entendimento da fertilidade do solo no sentido exclusivo da teoria mineralista, há 150 anos, favoreceu a ilusória convicção que o seu pleno potencial é alcançado com adubação química (Rotini, 1984), mesmo se há dois mil anos Columella já considerava as faces física, química e biológica integradas na sua noção de fertilidade. Atualmente, como uma consequência do domínio da teoria mineralista, a fertilidade é entendida em sentido exclusivamente químico. Devido à fragmentação da Ciência do Solo em química, física, microbiologia, biologia e bioquímica, estudam-se os temas em solo isoladamente e, a partir do seu entendimento, atribui-se maior ou menor importância de uma determinada área do conhecimento no funcionamento do solo e na

produtividade das plantas. Em razão disso, no caso do tema fertilidade do solo, surgiram muitos adjetivos ou “denominações”, sempre definidos ou atribuídos com base no interesse do pesquisador. Na literatura internacional, podem ser encontradas inúmeras “denominações” para a fertilidade do solo: geral, agronômica, integral, atual, velha, dinâmica, física, química, biológica, mineral, orgânica, ecofisiológica etc. Isso confunde e afasta cada vez mais as pessoas do sentido da verdadeira e única fertilidade do solo. Também se observa confusão entre a fertilidade do solo e a nutrição de plantas (estas podem ser nutridas no solo ou na água).

Na época de Columella, o conceito de fertilidade contemplava todas as condições do solo para o nutrimento das plantas. A nutrição — elementos essenciais às plantas — foi enfatizada depois de Saussure e Liebig, e atualmente a fertilidade é a disponibilidade de nutrientes e a ausência de elementos tóxicos no solo. Tem-se a impressão de que quanto mais a fertilidade é detalhada, e maior é a tecnologia aplicada para avaliá-la, mais se afasta da essência; perde-se a noção do todo; por isso, maior é a discrepância entre o conceito da fertilidade elaborado pelos homens e a fertilidade do solo percebida pelas plantas. Um conceito claro e satisfatório a todos os interessados nessa fertilidade deve ser construído com a integração das diversas áreas do conhecimento em Ciência do Solo, entendendo o solo como um sistema aberto e a fertilidade como uma propriedade de todo o sistema solo.

Por tudo isso, o que escreveu Oliva (1939) — “se tudo é parte e tudo retorna à terra, a fertilidade é um anel do ciclo da vida; o solo, que há 12 mil anos produz alimentos à população crescente, é um problema científico e o enigma da fertilidade, mesmo depois de extraordinários progressos científicos, continua em aberto” — continua verdadeiro e atual depois do ano 2000 d.C. Essa falta de clareza sobre a fertilidade do solo e de coerência do conceito com a metodologia de avaliação verificada na literatura internacional também é observada no Brasil, com a diferença de que neste país o estudo da fertilidade e da Ciência do Solo é muito recente e só foi intensificado a partir da metade do século XX. Embora atualmente não haja consenso sobre o conceito de fertilidade do solo, este passou de uma percepção ampla para uma restrita à química do solo que é o conceito tradicional utilizado praticamente por todos, tanto no solo cultivado no sistema convencional como no sistema plantio direto.

2.2.2 Evolução do conceito da fertilidade do solo no Brasil

O conceito mais antigo de fertilidade de solo encontrado na literatura agronômica brasileira foi publicado somente depois da metade do século XX. Provavelmente, uma consequência da recente dedicação dos brasileiros à Ciência em geral e, mais recente ainda, à Ciência do Solo. O estímulo à Ciência do Solo no Brasil teve início com a fundação do Instituto Agronômico em Campinas em 1887, e a pesquisa em solos se intensificou a partir da década de 1960 devido à implantação dos primeiros Cursos de Pós-Graduação em Ciência do Solo, em Viçosa (UFV, 1961), em Piracicaba (ESALQ, 1964) e em Porto Alegre (UFRGS, 1965) (Malavolta, 1981).

Principalmente na primeira metade do século XX, nas escolas de agronomia e nos institutos de pesquisa na região sul do Brasil era muito freqüente a referência à fertilidade do solo como “bom senso e aplicação de esterco” (Tedesco, 2007 — comunicação pessoal). Provavelmente, o primeiro conceito em fertilidade do solo publicado no Brasil foi o de Catani et al. (1955). Segundo os autores, “fertilidade é a capacidade do solo em fornecer elementos nutritivos, água e ar em quantidades suficientes para o desenvolvimento de diversas culturas, dentro das limitações impostas pelo clima e por outros fatores”. Esse é, provavelmente, dos conceitos de fertilidade elaborados no século XX o mais abrangente por incluir a água e o ar. Quase duas décadas mais tarde, Coelho (1973) repete parte do conceito, ao afirmar que “fertilidade é a capacidade de um solo fornecer nutrientes às plantas em quantidades adequadas e proporções convenientes”. Evidentemente, sempre que a palavra capacidade é incluída no conceito indica que a fertilidade é resultante das interações físico-químico-biológicas que ocorrem no solo. Quando avaliada, no entanto, esta concepção de fertilidade se limita à face química da fertilidade do solo, pois somente a reatividade e o teor de nutrientes são determinados.

A re-escrita ou a própria cópia de um enunciado em fertilidade do solo escancara a dificuldade de discernimento no assunto. É o que se constata na enunciação de Freire et al. (1988), ao definir fertilidade como o conjunto das características químicas, físicas e biológicas do solo, adequadas para a planta expressar seu potencial máximo de produtividade. Na verdade, ela é o resultado da interação do conjunto de características e não o conjunto em si. Em seqüência, os autores definem solo fértil como aquele que apresenta

quantidades suficientes e balanceadas de todos os nutrientes essenciais, em condições de serem absorvidos pelas plantas. Isso, em parte, contradiz a definição de fertilidade anterior, pois aquela é ampla e esta de solo fértil, restrita à disponibilidade de nutrientes. A Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (Cury et al., 1993), assim como fez a americana (SSSA, 1987), apenas confirma o conceito mineralista de fertilidade do solo — estado de um solo com respeito a sua capacidade de suprir os nutrientes essenciais às plantas. Por estas percepções, nota-se que, no Brasil e na literatura internacional, a fertilidade do solo é entendida como a fertilidade química, diferente dos conceitos de fertilidade publicados na metade do século XX (Scarponi, 1949; Haussmann, 1950; e Catani et al., 1955), que expressam muito melhor a real fertilidade dos solos, ou seja, a percebida pelas plantas.

A necessidade de uma reflexão mais ampla e profunda sobre o que é a fertilidade do solo, e a percepção de que o seu conceito químico é insuficiente, também é evidenciada na contradição entre as noções publicadas no início do século XXI. A noção expressa por Mielniczuk et al. (2000) — a fertilidade é a capacidade do solo de propiciar condições para que as plantas expressem o seu potencial produtivo, com adequado fornecimento de energia solar, temperatura e umidade — é ampla, semelhante à de Catani et al. (1955) e a de fertilidade agrônômica de Casalicchio (1978). No mesmo ano, uma restrita foi escrita por Kaminski & Rheinheimer (2000) — depende do sincronismo entre a capacidade do solo de fornecer os nutrientes em quantidades e taxas suficientes e a habilidade das plantas de absorvê-los. Esses conceitos, até certo ponto incoerentes e discordantes, indicam, em parte, a mudança de sistema de manejo do solo, principalmente na região sul do Brasil. Por muito tempo, na verdade desde Liebig, o conceito mineralista se relacionou bem com produtividade. Mas nesse período, todo o conhecimento foi produzido essencialmente no sistema convencional, no qual o ato de lavrar a terra era tido (e continua sendo) como intrínseco ao processo de fazer agricultura.

A revisão feita sobre o assunto, no Brasil, indica que não há consenso sobre o que é fertilidade do solo. A esta, no entanto, no país, não são atribuídas “denominações”, sendo entendida como única, embora com base na teoria mineralista e considerando somente a face química da fertilidade. Possivelmente, para o solo cultivado no sistema convencional, o conceito de

Lopes et al. (2004) de que a fertilidade é a qualidade do solo que o torna capaz ou não de fornecer nutrientes em quantidades e proporções adequadas para o crescimento das plantas, quando os outros fatores forem favoráveis, ou o conceito de solo fértil de Tedesco (1995), seja suficiente. Porém, para os solos cultivados no sistema plantio direto, percebe-se que essa noção química nem sempre expressa a fertilidade do solo percebida pelas plantas.

O entendimento da fertilidade precisa ser ampliado para além da química do solo (Nicolodi et al., 2004b; D'Agostini, 2006; Schlindwein, 2006). Em 2004, a fertilidade foi conceituada como uma propriedade emergente⁵ do processo de auto-organização do sistema solo, resultante da interação entre as suas condições químicas, físicas e biológicas, que possibilita o desenvolvimento e a produtividade das plantas (Nicolodi et al, 2004a). O desafio que se impõe agora é aprender a lidar com a fertilidade como uma propriedade sistêmica, ampliando os limites das práticas para além dos aspectos químicos (Schlindwein, 2006). A decisão de tratar efetivamente a fertilidade do solo como propriedade emergente representa(ria), de fato, importante esforço em Ciência do Solo, na busca contínua por mais coerência (D'Agostini, 2006).

Obviamente que, independentemente do conceito, o avanço em Ciência do Solo, e no entendimento da fertilidade, foi grande nos últimos 150 anos no mundo e nos últimos 50 anos no Brasil. Principalmente neste país, que possui solos ácidos e pobres em nutrientes, a aplicação do conhecimento da fertilidade, pela recomendação de adubação e calagem com base nas análises químicas do solo, contribuiu muito para o progresso da agricultura.

As percepções tradicionais de fertilidade do solo são sintetizadas no fornecimento de nutrientes essenciais, em quantidades e proporções adequadas, e na manutenção da ausência de elementos tóxicos para o desenvolvimento das plantas. Esse conceito, amplamente utilizado no Brasil, será considerado neste trabalho como “conceito tradicional da fertilidade do solo”. Com base neste, será avaliada a aplicação do seu conhecimento na fertilidade e no uso agrícola dos solos do Rio Grande do Sul e avaliada a necessidade de mudança no conceito para expressar a fertilidade, principalmente nos solos cultivados no sistema plantio direto.

⁵ Emergentes são as propriedades do todo, não são redutíveis à soma dos efeitos dos elementos isolados, não estão presentes no nível inferior, não podem ser explicadas e nem reduzidas aos elementos que interagiram para gerá-la (Odum, 1983).

3. APLICAÇÃO DO CONCEITO TRADICIONAL E A SUA INSUFICIÊNCIA PARA EXPRESSAR A FERTILIDADE DO SOLO PERCEBIDA PELAS PLANTAS

Na Antigüidade, os homens percebiam a fertilidade como nutrimento que as plantas retiravam da terra, por isso, consideravam integradas suas faces física, química e biológica do solo. Desde a Idade Moderna, o enfoque passou para o alimento das plantas, ou seja, identificar e suprir os nutrientes e eliminar os elementos tóxicos para elas. Por isso foram consideradas, a partir dessa época, somente as propriedades químicas no desenvolvimento e produtividade das culturas. Assim, em 12 mil anos de agricultura, a noção de fertilidade do solo passou de ampla para restrita — à adição de nutrientes e à correção da acidez ou alcalinidade do solo. O conceito tradicional de fertilidade é amplamente utilizado no mundo há mais de um século e meio. No item a seguir avalia-se esse conceito através dos efeitos das práticas recomendadas para a sua melhoria (adubação e calagem) no uso agrícola e na fertilidade dos solos na região produtora de grãos do Rio Grande do Sul, nos últimos 40 anos, e a sua capacidade de expressar a fertilidade percebida pelas plantas nos solos com diferentes sistemas de cultivo e rotações de culturas.

3.1 Aplicação do conceito tradicional de fertilidade do solo no Rio Grande do Sul

A principal aplicação do conhecimento de fertilidade do solo é potencializar o rendimento das culturas por meio da nutrição das plantas via recomendação e aplicação de adubos (minerais ou orgânicos) e de corretivos (de acidez ou de alcalinidade). A melhoria da fertilidade dos solos é uma preocupação no RS pelo menos desde o início do século XX. Uchoa (1926) destacou que a água capilar é o grande fator regulador da fertilidade do solo e deveria ser mantida a todo o custo. Mohr (1960) relatou que desde 1920 eram conduzidos estudos sobre a acidez do solo e enfatizou que a sua correção deve ser acompanhada das adubações verde e química. Tedesco (2007 —

comunicação pessoal) explicou que naquela época a farinha de osso e o esterco eram as principais fontes de nutrientes aplicadas ao solo.

O conhecimento da fertilidade — com base no conceito tradicional — é aplicado de modo muito semelhante em todo o Brasil. São poucas as diferenças nos métodos analíticos ou nos valores dos indicadores de fertilidade e as recomendações variam conforme a região, o sistema de cultivo e as espécies cultivadas. As tabelas de recomendação de nutrientes são elaboradas a partir das curvas de calibração em que são definidos o teor crítico e as faixas de interpretação dos teores no solo. Pela comparação dos valores obtidos pela análise da amostra de solo com aqueles das faixas de teores, se atribui o grau de fertilidade e, para cada cultura, se estabelece a quantidade de nutrientes a aplicar. Por exemplo, para os Estados do Rio Grande do Sul (RS) e Santa Catarina (SC), as faixas de teores para fósforo e potássio são “Muito baixo”, “Baixo”, “Médio”, “Alto” e “Muito alto” (CQFS RS/SC, 2004).

As primeiras tabelas de recomendação foram elaboradas em 1967, para atender à demanda criada pela “Operação Tatu” e pela expansão da área cultivada especialmente com espécies graníferas. As recomendações de adubação e de calagem foram revisadas e aperfeiçoadas pela Rede Oficial dos Laboratórios de Análises de Solos e de Tecido Vegetal (ROLAS) até 1981 e pela Seção de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas do Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (NRS/SBCS) desde 1989 (Anghinoni, 2005). Com o aprimoramento das recomendações, foram sendo agregadas determinações de outros indicadores para melhorar a avaliação da fertilidade. Nas primeiras tabelas os indicadores eram pH em água (pH), índice SMP, fósforo (P) e potássio (K) disponíveis e matéria orgânica (MO); em seguida agregou-se a determinação de argila para a interpretação do P (Mehlich 1); depois a de alumínio (Al), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) trocáveis. Com o uso de sistemas informatizados, foram incluídos os cálculos de CTC e das saturações por bases da $CTC_{pH7,0}$ (V) e por alumínio da $CTC_{efetiva}$ (m). Por último, foram adicionadas as determinações de enxofre e micronutrientes.

Em 1967, a recomendação de adubação consistia na correção — elevar os teores de P e K ao nível de suficiência no primeiro cultivo — e na manutenção por cultura — adição de nutriente para atender a necessidade da planta; a de calagem era feita para elevar o pH do solo a 6,0 (Volkweiss &

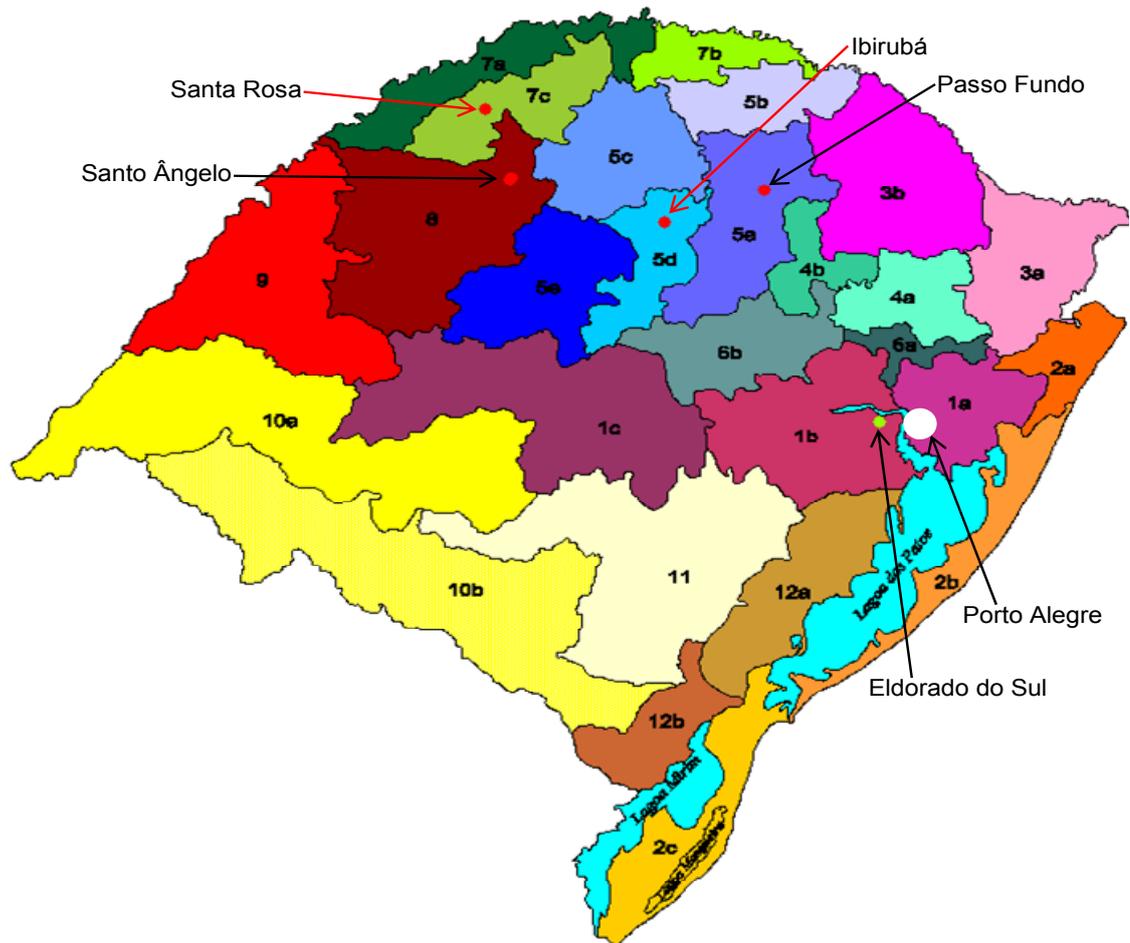
Klamt, 1969). As recomendações foram revisadas em 1969, 1971, 1973, 1975, 1981 e as maiores alterações feitas em 1987, 1995 e em 2004. Em 1987, houve a introdução da correção gradual dos nutrientes do solo para atingir os níveis de suficiência em três cultivos ou anos agrícolas. As recomendações para as culturas de grãos foram sempre elaboradas para o cultivo no sistema convencional (SC); somente a partir de 1995 foram incluídas algumas recomendações específicas para o sistema plantio direto (SPD). Em 2004, foram feitas inúmeras alterações nas recomendações. Este conjunto de informações técnicas, com o objetivo de aumentar ou manter a fertilidade do solo, é denominado “Manual de Adubação e de Calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina” (CQFS RS/SC, 2004).

Atualmente, a recomendação de adubação tem como princípio ou meta elevar e manter a reserva do nutriente no solo numa faixa adequada ao desenvolvimento da maioria das culturas (faixa “Alto”). Portanto, conforme a faixa de interpretação do nutriente no solo, a adubação pode ser de correção, de manutenção ou de reposição. A adubação de correção é feita sempre que as faixas de P e K são interpretadas como “Muito baixo”, “Baixo” e “Médio”. Nesse caso, a quantidade total de adubo aplicada é proporcional às faixas e deve corrigir a concentração de nutriente até aproximadamente o teor crítico. Junto com essa, sempre é necessário fazer a adubação de manutenção, que consiste na reposição do nutriente exportado pelos grãos ou matéria seca, conforme a expectativa de rendimento, mais as perdas do sistema de cultivo (faixa “Alto”). Na adubação de reposição (faixa “Muito alto”), a quantidade de adubo aplicada ao solo visa repor os nutrientes exportados pelos grãos ou matéria seca conforme a expectativa de rendimento da cultura. A recomendação de adubação nitrogenada é feita de acordo com as faixas de MO no solo, a cultura antecessora e sua produção de matéria seca e a produtividade esperada da cultura. No caso do P, devido ser o método influenciado pelo teor de argila, esta é considerada na interpretação dos resultados. Para a interpretação das faixas de teor de K é utilizada a $CTC_{pH\ 7,0}$ do solo. A recomendação de corretivos de acidez é feita conforme a sensibilidade das culturas e o sistema de cultivo do solo utilizando-se um conjunto de indicadores (pH, V, m e P) (CQFS RS/CS, 2004).

3.1.1 Evolução do uso agrícola dos solos no Rio Grande do Sul

Os solos do RS eram predominantemente ácidos e pobres em nutrientes (BRASIL, 1973). Provavelmente, por isso, o uso agrícola desses solos e a expansão da agricultura foram, em grande parte, influenciados pela aplicação do conhecimento da fertilidade. No Estado, originalmente sustentado pela pecuária, a agricultura foi intensificada somente no século XX, em virtude do assentamento no século XIX de imigrantes alemães e italianos na Encosta Inferior e na Serra do Nordeste (Figura 1), onde predominam Chernossolos e Neossolos de maior fertilidade (Mielniczuk, 1999; Anghinoni, 2005). Os descendentes dos imigrantes deslocaram-se, a partir de 1890, em razão do empobrecimento da fertilidade desses solos e do aumento da população, para áreas de mata nas regiões do Planalto Médio, Missionária e Alto Vale do Uruguai (Figura 1), onde predominavam Latossolos e Neossolos, formando as chamadas Colônias Novas em contraposição aos locais de origem denominados Colônias Velhas. Na época, a agricultura era familiar e de subsistência, o preparo do solo e a semeadura eram feitos com implementos de tração animal e eram cultivados principalmente trigo, milho, feijão e olerícolas.

O cultivo de arroz para fins comerciais foi intensificado a partir de 1920; de trigo, no final da década de 1940; e de soja, no início da década de 1970. No início da década de 1950, incentivos do Governo conduziram ao monocultivo de trigo; porém, as freqüentes frustrações de safras dessa cultura tornaram o cultivo da soja, em sucessão ao trigo, a principal fonte de lucro da agricultura. No final dessa década, o cultivo da soja começou a se expandir também para as áreas de campo (Figura 2), em solos pobres em nutrientes e ácidos. Na década de 1960, enquanto muitos agricultores das Colônias Novas abandonavam suas lavouras por serem improdutivas e imigravam para outros estados (Mielniczuk, 1999), nas regiões do Planalto Médio e Missionária, a agricultura mecanizada se expandia nas áreas de campo, estimulada pela soja, com intensificação do cultivo do solo. Assim, surgiu uma agricultura com características e exigências bem diferentes da lavoura colonial (Bonetti, 1987). Em 1941 foram cultivados 640 hectares de soja, em 1961 mais de 220.000, em 1971 mais de 1.100.000 e em 2004 mais de 4.000.000 de hectares no Estado (EMATER, 2007).



Legenda: regiões e sub-regiões agroecológicas e Colônias Velhas e Novas

1. Depressão Central (1a: Grande Porto Alegre; 1b: Rio Pardo -Taquari; 1c: Santa Maria)
 2. Litoral (2a: Litoral Norte, 2b: Litoral Médio, 2c: Litoral Sul)
 3. Planalto Superior (3a: Bom Jesus - São Francisco de Paula; 3b: Vacaria - Lagoa Vermelha)
 4. Serra do Nordeste (4a: Caxias do Sul - Bento Gonçalves; 4b: Veranópolis - Guaporé)
 5. Planalto Médio (5a: Passo Fundo; 5b: Erechim; 5c: Palmeira das Missões; 5d: Bacia do Jacuí; 5e: Cruz Alta)
 6. Encosta Inferior da Serra do Nordeste (6a: Vale do Caí; 6b: Santa Cruz)
 7. Alto Vale do Uruguai (7a: Três Passos; 7b: Nonoai - Marcelino Ramos; 7c: Santa Rosa - Seberi)
 8. Missionária de Santo Ângelo - São Luiz Gonzaga
 9. São Borja - Itaqui
 10. Campanha (10a: Uruguaiana - São Gabriel; 10b: Fronteira Uruguaia)
 11. Serra do Sudeste
 12. Região das Grandes Lagoas (12a: Patos; 12b: Mirim)
- Colônias Velhas (sub-regiões: 4a, 4b, 6a, 6b)
Colônias Novas (sub-regiões: 5a, 5d, 7a, 8)

Figura 1. Regiões agroecológicas do RS e as Colônias Velhas e Novas (Secretaria da Agricultura e Abastecimento do RS, 1994).

A fertilidade do solo no RS passou a ser objeto de interesse quando a produtividade das plantas diminuiu, em consequência da diminuição das reservas de nutrientes dos Neossolos e Chernossolos e pela expansão da área cultivada com trigo e soja em Latossolos mais ácidos e pobres em nutrientes. Naquela época, havia pouca informação de pesquisa à disposição para atender essa demanda e as recomendações de corretivos e de adubos eram feitas com pouca base de pesquisa local, o preparo do solo era convencional (SC), com

arado de disco e grade, duas vezes por ano e com queima da palha (resíduos das culturas), e o terraceamento e semeadura em contorno eram as principais práticas de conservação do solo (Mielniczuk, 1999).

Somente a partir de 1965, com a criação do Curso de Pós-Graduação em Agronomia, com Área de Concentração em Solos, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), foram intensificadas as pesquisas no campo para identificar as causas da baixa produtividade dos solos do RS (Wiethölter, 2000). Os resultados de pesquisa confirmaram que a baixa produção agrícola era causada, principalmente, pelos baixos teores de P e K, alta acidez e manejo inadequado dos solos e das plantas. Entusiasmados com a possibilidade de até quadruplicar a produtividade das culturas, pesquisadores da UFRGS, da Secretaria da Agricultura do RS (SARGS) e do Instituto de Pesquisas e Experimentação Agropecuárias do Sul (IPEAS), junto com os técnicos da Associação Sulina de Crédito e Assistência Rural (ASCAR) promoveram um Programa de Extensão Rural para aumentar a fertilidade do solo (Volkweiss & Klamt, 1969). O Programa, que ficou conhecido como “Operação Tatu”, consistia em motivar os agricultores a adicionarem ao solo quantidades de calcário e de adubos de acordo com os resultados da análise química do solo (Rioja & Nolla, 1969).

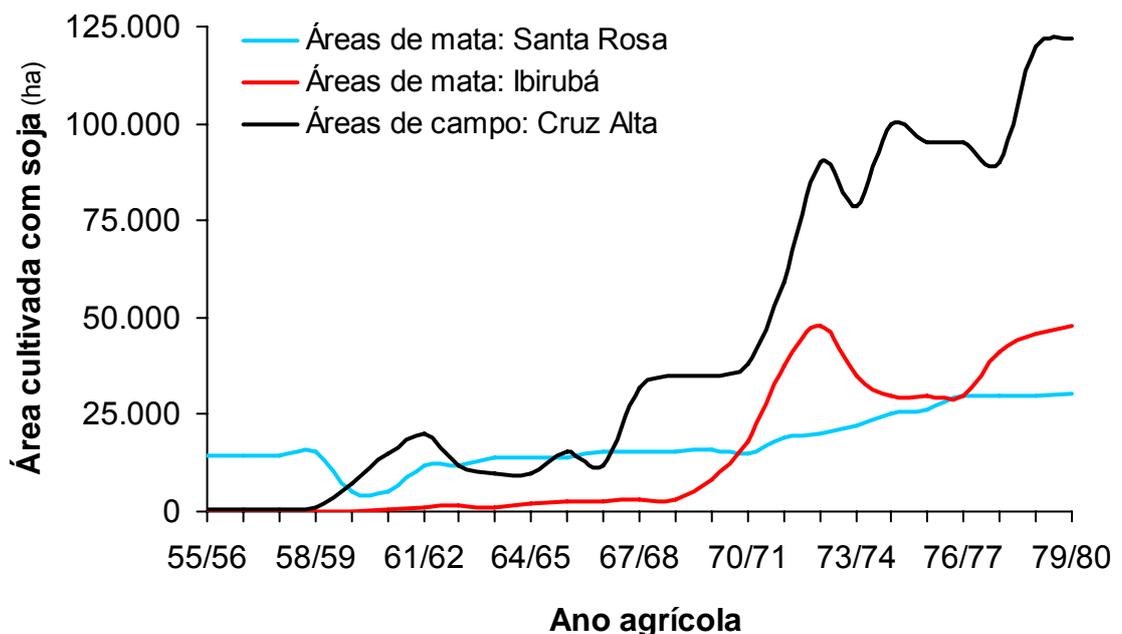


Figura 2. Expansão do cultivo da soja em áreas de mata, em Santa Rosa e Ibirubá, e de campo natural, em Cruz Alta, no Planalto Médio do RS entre 1955 e 1980 (EMATER, 2007).

A “Operação Tatu” teve início em Ibirubá, em 1966, e em Santa Rosa, em 1967, com a amostragem do solo para conhecer o nível da fertilidade e com a instalação de lavouras demonstrativas (Noskoski, 1971). Em Ibirubá, o seu sucesso foi limitado pela falta de crédito agrícola para investimento em correção do solo (Mielniczuk, 1999). No ano seguinte a implantação da “Operação Tatu” em Ibirubá, foi liberada uma linha de crédito de investimento pelo Banco Central para financiar a correção do solo para atender o Projeto de Melhoramento da Fertilidade do Solo de Santa Rosa, apresentado ao Banco do Brasil (Kappel, 1967). Essa linha de crédito foi determinante para o sucesso das “Operações Tatu” e possibilitou a aplicação das quantidades de adubo e de calcário necessárias para corrigir a acidez e aumentar os teores de P e K dos solos. Nessas, foram envolvidas quase todas as instituições que atuavam no meio rural que resultou, em 1969, no Plano Estadual de Melhoramento de Fertilidade do Solo (ASCAR, 1969; Volkweiss & Klamt, 1969). O Plano foi delineado com base nos resultados do levantamento da fertilidade de 1967 (Tabela 1), que mostrou estar o teor de P (94% das amostras) e de MO (74% das amostras) dos solos avaliados no RS nas faixas “Muito baixo” e “Baixo”, e executado em dez “Operações Tatu” contemplando 70 municípios entre 1966 e 1969 (ASCAR, 1969; Noskoski, 1971).

Tabela 1. Distribuição percentual dos teores de matéria orgânica e de fósforo nos solos de dez regiões fisiográficas do RS em faixas de fertilidade (ASCAR, 1969)

Região fisiográfica	Matéria orgânica (%)				Fósforo disponível (mg dm ⁻³)			
	Muito baixo	Baixo	Médio	Bom	Muito baixo	Baixo	Médio	Bom
	<2	2,1-3,5	3,6-5	>5,1	<3,4	3,5-6,4	6,5-8,9	>9
Planalto Médio	8	75	15	2	76	8	5	11
Alto Vale do Uruguai	11	63	22	4	91	7	1	1
Missionária	14	56	29	1	92	7	0	1
Encosta superior NE	6	40	46	8	66	16	4	14
Campos de Cima da Serra	2	17	76	5	69	17	7	7
Encosta inferior NE	32	66	2	0	50	13	16	21
Depressão Central	55	40	4	1	75	14	3	8
Encosta do Sudeste	52	38	5	5	53	24	0	23
Serra do Sudeste	14	72	11	3	67	16	3	14
Campanha	21	52	15	12	67	12	0	21
Média no RS	22	52	23	4	71	13	4	12

A adoção da filosofia da “Operação Tatu” possibilitou um considerável aumento na produtividade das culturas no ano da aplicação e

efeito residual por vários anos (Mielniczuk & Anghinoni, 1976). A análise de solos se consolidou como meio de avaliação da fertilidade e de recomendação de fertilizantes (Tedesco et al., 1984). As “Operações Tatu” geraram grande entusiasmo e esperança de dias melhores entre as pessoas ligadas à agricultura no RS (Volkweiss & Klamt, 1969) e as Colônias iniciaram uma nova fase de progresso sem precedentes (Mielniczuk, 1999). A filosofia da “Operação Tatu”, de que altas produtividades eram obtidas somente com alta fertilidade, foi difundida em todo o país, em contraposição à agricultura pobre de baixa aplicação de insumos (Freire et al., 2006). É importante observar que a aplicação do conceito da fertilidade consistia em corrigir a acidez e aplicar nutrientes P e K para elevar o teor no solo ao teor crítico para qualquer sistema de cultivo. Na época, o SPD não era utilizado, portanto, a aplicação do conceito, como feito, em solos cultivados no SC, proporcionou bons resultados para a agricultura do país.

Na década de 1970, a agricultura mecanizada se expandiu muito, assim como a soja, muitas vezes em solos impróprios para a mecanização e para a agricultura (Mielniczuk, 1999). O cultivo da rotação trigo/soja gerou, num primeiro momento, a sensação de um negócio muito lucrativo e depois se transformou na principal causa da degradação dos solos. A situação ficou mais grave ainda quando o trigo passou a ser substituído pelo repouso (pousio) do solo, o que culminou com o monocultivo da soja (Denardin, 1998). Em 1979, o entusiasmo dos agricultores com a soja começou a diminuir pela coincidência da maior expansão da área cultivada e de frustração de safra devido às condições climáticas adversas, que resultou em baixa produtividade (Bonetti, 1987).

Desde o início da agricultura intensiva, os solos, originalmente sob mata ou campo, eram preparados de maneira convencional (SC), seguindo as tradições da agricultura européia e americana. O excesso de revolvimento do solo e sua exposição periódica aos raios solares, vento e chuva (Jaster et al, 1993) resultou em erosão hídrica com danos irreversíveis à fertilidade dos solos, eliminando as camadas superficiais — as mais férteis do solo (Tabela 2) — e reduzindo a capacidade produtiva dos solos especialmente no Planalto Riograndense (Cassol, 1986).

Tabela 2. Perdas médias de solo por erosão sob chuva natural de quatro anos agrícolas¹, em diferentes sistemas de cultivo e manejo da palha, com rotação trigo/soja, em Passo Fundo (Wünche & Denardin, 1980)

Sistemas de cultivo e manejo da palha	Perda de solo (t ha ⁻¹)
SC com queima da palha	12,8
SC com incorporação da palha	3,7
SPD com palha mantida na superfície	1,1

¹ 1976/1977; 1977/1978; 1978/1979; 1979/1980

A crescente mecanização e o cultivo intensivo dos solos no SC, associados à alta intensidade das chuvas nos períodos de solo descoberto, fizeram com que a erosão e a degradação dos solos chegassem a um estágio de calamidade (Wünche et al., 1980), colocando em risco o futuro da agricultura no RS (Mielniczuk, 1999). Junto a essa degradação física, houve a diminuição da fertilidade e a estagnação da produtividade das culturas, uma vez que os benefícios da correção da acidez e da adição dos nutrientes no solo não eram mais observados. A fim de transferir a tecnologia existente para conter a erosão e melhorar o manejo e a conservação do solo no RS, teve início em 1979 o Projeto Integrado de Uso e Conservação do Solo (PIUCS). Como consequência da adoção do manejo recomendado pelo PIUCS, os agricultores mudaram suas atitudes em relação aos cuidados com o solo: o terraço deixou de ser sinônimo de conservação do solo, a queima da palha diminuiu, o cultivo de espécies de cobertura (adubação verde) aumentou e a mobilização do solo foi substancialmente reduzida (Mielniczuk et al., 1983). Dentre outras ações de manejo do solo desenvolvidas depois do PIUCS, destacam-se o Projeto Saraquá, a partir de 1980, o Programa Estadual de Microbacias Hidrográficas, a partir de 1984, o Projeto de Viabilização e Difusão do Sistema Plantio Direto no Rio Grande do Sul (METAS) a partir de 1992 (Mielniczuk, 1999) e, ainda, a formação de grupos de pessoas para trocas de experiências na agricultura, a partir da década de 1980. Destes, destacam-se os Clubes Amigos da Terra (CAT's), responsáveis pelas principais mobilizações a favor do SPD (Denardin, 1998).

O sucesso do SPD é, em grande parte, determinado pela percepção, na década de 1980, de que, para ser viabilizado técnica e economicamente, ele deveria ser entendido como um sistema de exploração agropecuário diversificado, fundamentado no uso de diferentes espécies, na rotação de

culturas, na mobilização do solo exclusivamente na linha de semeadura e na manutenção permanente da cobertura do solo. Em 1992, constatou-se que, embora a maioria dos agricultores estivesse consciente da necessidade, havia dificuldades na adoção desse sistema. Para superá-las, teve início, em 1993, o projeto METAS, que gerou, adaptou e disponibilizou conhecimentos que garantiram a implantação e a continuidade do SPD em escala de lavoura (Denardin et al., 2006). Portanto, devido ao trabalho desenvolvido com esse projeto e pelos CAT's, a agricultura gaúcha progrediu muito com a mudança de cultivo do solo do SC para o SPD com diversificação de culturas (Figura 3), em que, além de trigo e soja, foram incluídas a aveia, o milho, o nabo forrageiro, a ervilhaca, a cevada, o triticale, o tremoço, a colza e o girassol, entre outras.

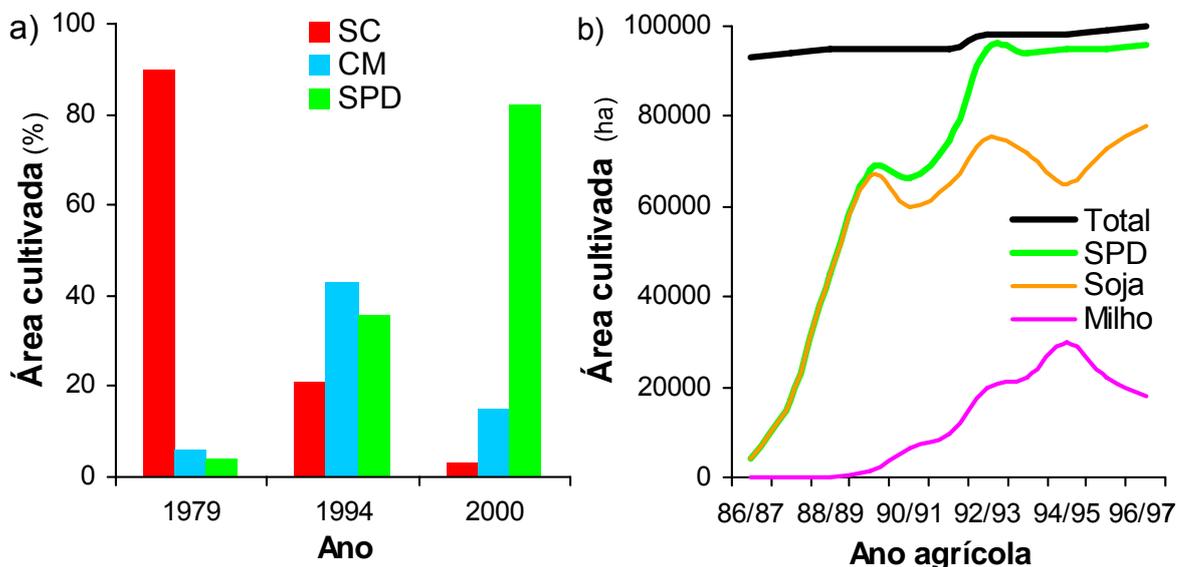


Figura 3. Mudança do sistema de cultivo do solo no Planalto Médio (a) e na área cultivada no SPD com milho na rotação de culturas em Cruz Alta (b) [(a): Mielniczuk et al., 2000; (b): CAT de Cruz Alta – dados não publicados].

A mudança do cultivo do solo no SC para o SPD altera drasticamente a taxa de revolvimento, priorizando a manutenção do solo coberto por plantas o ano todo. A diversidade de espécies na rotação permite a melhor conservação do solo e o aumento da fertilidade e da produtividade das culturas. Os benefícios do SPD ao solo aumentam com o tempo da sua adoção. As condições físicas, químicas e biológicas melhoram a partir da superfície do solo, formando gradientes. Entre as melhorias verificadas, estão a diminuição da oscilação de temperatura, o aumento dos teores de MO, a maior

ciclagem de nutrientes, a diminuição da toxidez por Al, a maior estruturação do solo e, conseqüente, o aumento da capacidade de retenção de água e o aumento da fertilidade dos solos (Bayer & Mielniczuk, 1997; Anghinoni & Salet, 1998; Sá, 1999; Ciotta et al., 2002).

Nos últimos 50 anos, houve importantes mudanças que determinaram o progresso da agricultura no Planalto do RS e resultaram no aumento da produtividade das culturas (Figura 4). As principais ocorreram no uso (Figura 2) e na fertilidade do solo (“Operações Tatu” e nas recomendações), na mecanização, na área cultivada (Figuras 2 e 4), na degradação (Tabela 2) e na conservação do solo (PIUCS), na mudança do sistema de cultivo (CAT’s e METAS) (Figura 3a), na utilização de agroquímicos, no melhoramento genético das plantas e na adoção da rotação e diversificação das espécies cultivadas (Figura 3b).

3.1.2 Evolução da fertilidade em solos do Planalto do Rio Grande do Sul

As principais mudanças ocorridas na agricultura nos últimos 50 anos, conforme visto anteriormente, que influenciaram a fertilidade do solo no Planalto — região produtora de grãos do RS — foram: 1) crescimento da área cultivada em solos impróprios para a agricultura e/ou para a mecanização; 2) intensificação do uso do solo cultivado no SC, primeiro com monocultivo de trigo e queima da palha após a colheita, depois com rotação trigo/soja e, por último, com monocultivo de soja, que culminou na degradação do solo causada principalmente pela erosão hídrica; 3) uso de quantidades de adubos e corretivos de acordo com a situação de cada solo (“Operações Tatu”); 4) modernização da mecanização agrícola facilitando o transporte e a distribuição dos fertilizantes; e 5) adoção do SPD e da rotação de culturas, com uso de adubos verdes e diversificação das espécies cultivadas, para manter o solo coberto por plantas a maior parte do ano e deixar grande quantidade de palha sobre o solo. Os dois primeiros eventos foram responsáveis pela diminuição da fertilidade dos solos, que em muitos casos já era baixa, e os últimos três contribuíram para o aumento da fertilidade. Com a intensificação do cultivo do solo no SPD e com o tempo e o tipo de rotação de culturas adotada nesse sistema, a ciclagem e o acúmulo de MO e de nutrientes aumentaram muito.

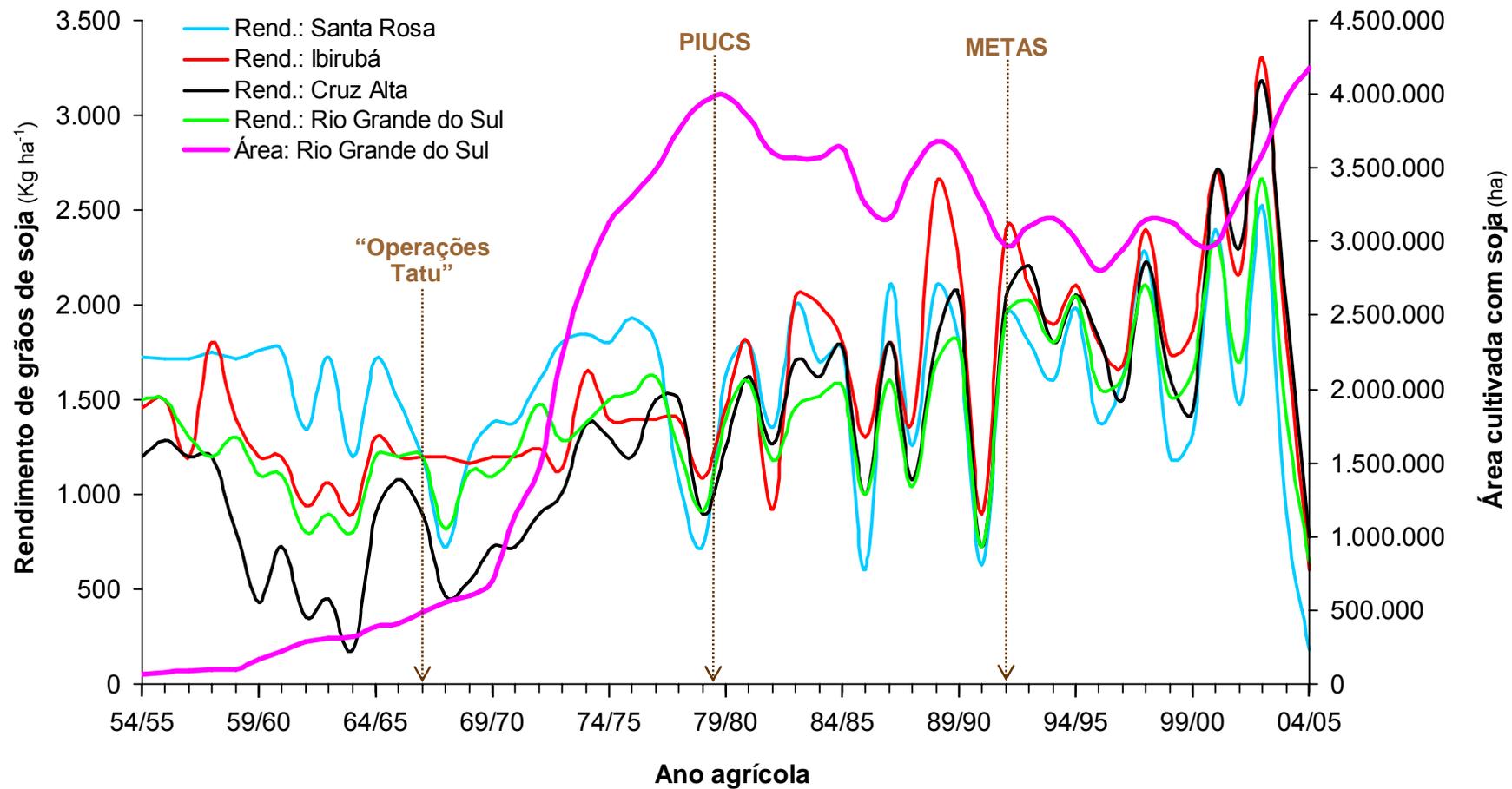


Figura 4. Evolução do rendimento de grãos da soja em Santa Rosa, Ibirubá, Cruz Alta e no RS e da área cultivada com soja no RS e relações com os principais programas de melhoria da fertilidade e conservação do solo (Adaptado de EMATER, 2007).

Uma análise detalhada da magnitude da mudança da fertilidade nos solos da região produtora de grãos, devido à implantação desses programas que influenciaram a fertilidade e se refletiram no grande progresso da agricultura (Figura 4), é fundamental para conhecer melhor os benefícios da aplicação do seu conceito tradicional nos solos do RS. A evolução da fertilidade dos solos no Planalto do RS nos últimos 40 anos foi avaliada pela comparação dos resultados das análises dos seus principais indicadores em levantamentos gerais, feitos com amostras enviadas aos laboratórios (1968: Porto, 1970; 1981: Tedesco et al., 1984; 1988; Drescher et al., 1995; 1997 a 1999: Rheinheimer et al., 2001), e específicos, feitos em Ibirubá e Santa Rosa (Material e métodos: Apêndice 1). Assim, a avaliação conjunta dos levantamentos gerais mostra uma importante melhoria na fertilidade dos solos, com base nos valores dos indicadores pH em água, MO e P disponível, nas regiões do Planalto Médio (PM) e do Alto Vale do Uruguai (AVU) e no RS de 1968 para 1999 (Figura 5).

Os resultados desses levantamentos são de grande importância, pois indicam que a fertilidade melhorou nesses solos no período avaliado. No entanto, têm aplicabilidade limitada e são insuficientes para serem utilizados para avaliar a magnitude da mudança da fertilidade. Esta limitação é consequência das alterações nas faixas de interpretação dos indicadores de fertilidade, das técnicas de amostragem, da variação no número de amostras por local, da época na coleta e das regiões utilizadas nos diversos levantamentos. Por isso tudo, devem ser interpretados com prudência.

Os valores de pH dos solos (Figura 5a) aumentaram muito; em 1968, apenas 25% dos resultados das análises de solo no RS — 8% no PM e 30% no AVU — tinham valor de pH menor do que 5,5, enquanto em 1988, aproximadamente 60% dos solos da região do PM, e no período de 1997 a 1999 80% dos solos do AVU, o valor de pH era maior que 5,5. O teor de MO (Figura 5b) também aumentou no período avaliado, sendo que mais de 80% dos solos do RS possuíam teor maior do que 2,6% no período de 1997 a 1999. Tendência semelhante foi observada para o P disponível (Figuras 5c e 5d). Em 1968, mais de 80% dos solos do RS — 90% no PM e no AVU — tinham menos de 4 mg dm⁻³ desse nutriente. Duas décadas mais tarde, o teor de P era menor do que 6 mg dm⁻³ em apenas 30% das análises no RS — 15% no PM e 10%

no AVU. Porém, depois dessa avaliação se observa, por esses levantamentos, uma tendência de diminuição nos teores de P nos solos.

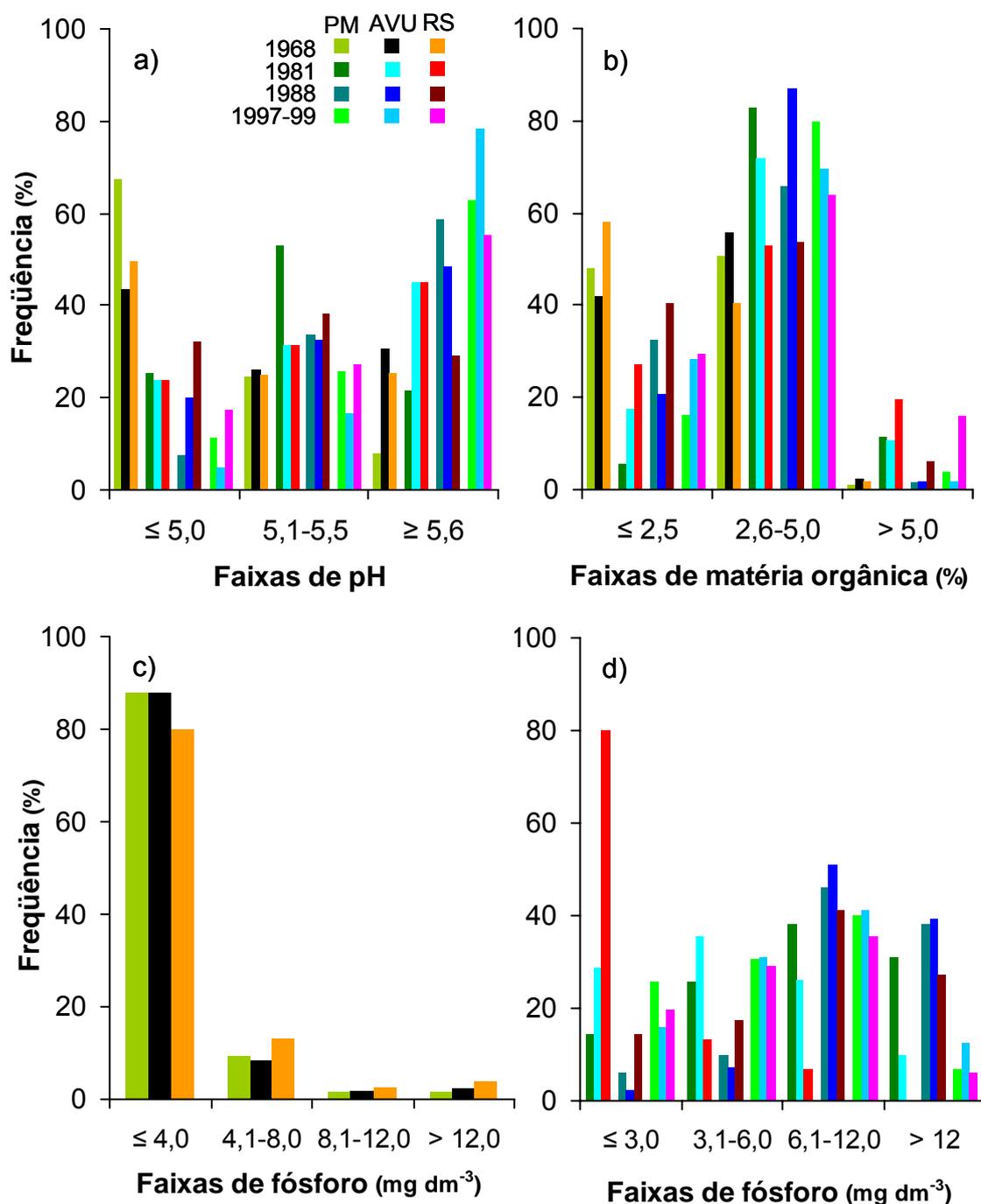


Figura 5. Evolução das faixas dos indicadores de fertilidade do solo — pH em água (a), matéria orgânica (b) e fósforo disponível (c e d) — nas regiões do Planalto Médio (PM) e do Alto Vale do Uruguai (AVU) e no Estado do Rio Grande do Sul (RS) (nos levantamentos de 1981 e 1988, a região do PM foi considerada a do Alto do Jacuí e a região do AVU a Colonial de Santa Rosa; de 1988 e de 1997 a 1999, as faixas de pH correspondem a $\leq 4,9$; $5,0-5,4$ e $\geq 5,5$).

Quando são comparados os resultados dos levantamentos feitos em 1967, das regiões fisiográficas do RS (Tabela 1) e de Santa Rosa, no início da “Operação Tatu”, com o feito em 1968 (Tabela 3), percebe-se que, naquela época, a fertilidade dos solos nas regiões PM e AVU e nos municípios de Ibirubá e de Santa Rosa era baixa e muito semelhante. O pH médio era menor ou igual a 5,0; a MO próxima de 2,5% em pelo menos 70% das amostras; o P menor que 3,4 mg dm⁻³ em 74%; e os valores médios de K entre 48 e 92 mg dm⁻³. Em função da semelhança do nível da fertilidade nos solos dos dois municípios no início das “Operações Tatu”, 1966 e 1967, e dos resultados do levantamento feito em Ibirubá em 1966 não terem sido encontrados, serão utilizados os de Santa Rosa para a avaliação da evolução da fertilidade. A região do PM será representada por Ibirubá e a do AVU por Santa Rosa.

A melhoria na fertilidade do solo expressa nos levantamentos gerais (Figura 5) também é percebida nas avaliações feitas em Santa Rosa e em Ibirubá (Figura 6). Nestes municípios, se observa que os indicadores pH (Figura 6a), MO (Figura 6b), P e K disponíveis (Figuras 6c e 6d) aumentaram gradualmente no tempo, pelos principais eventos relatados anteriormente, que influenciaram a fertilidade dos solos na região produtora de grãos, nos últimos 40 anos. Em 1967, mais de 65% das lavouras avaliadas tinham valores de pH do solo menor que 5,0; em 1984, a maior proporção tinha pH na faixa 5,1-5,5; e em 2004, pH maior que 6,0, sendo que em mais de 95% das lavouras, os valores de pH eram maiores que 5,6 (Figura 6a). Em 1967, em Santa Rosa, mais de 60% dos solos avaliados tinham teor de MO menor que 2,5% e em 2004, maior que 3,6% (Figura 6b). Nesse mesmo ano, em Ibirubá, mais de 85% dos solos apresentaram teor de MO maior que esse valor.

Tabela 3. Valores médios de indicadores de fertilidade avaliados nos municípios de Santa Rosa e de Ibirubá, nas regiões do Alto Vale do Uruguai e do Planalto Médio e no Estado do RS [Adaptado de Associação (1967) e de Porto (1970)]

Municípios e regiões	Número de amostras	Ano da análise do solo	Fonte	Indicadores de fertilidade			
				pH	MO %	P mg dm ⁻³	K mg dm ⁻³
Santa Rosa	2300	1967	Associação (1967)	4,7	2,5	1,0	58
Ibirubá	375			4,9	2,5	1,8	48
Alto Vale do Uruguai	7053	1968	Porto (1970)	5,0	2,7	1,7	92
Planalto Médio	7756			4,7	2,5	1,9	75
RS	27814			4,6	2,3	1,9	75

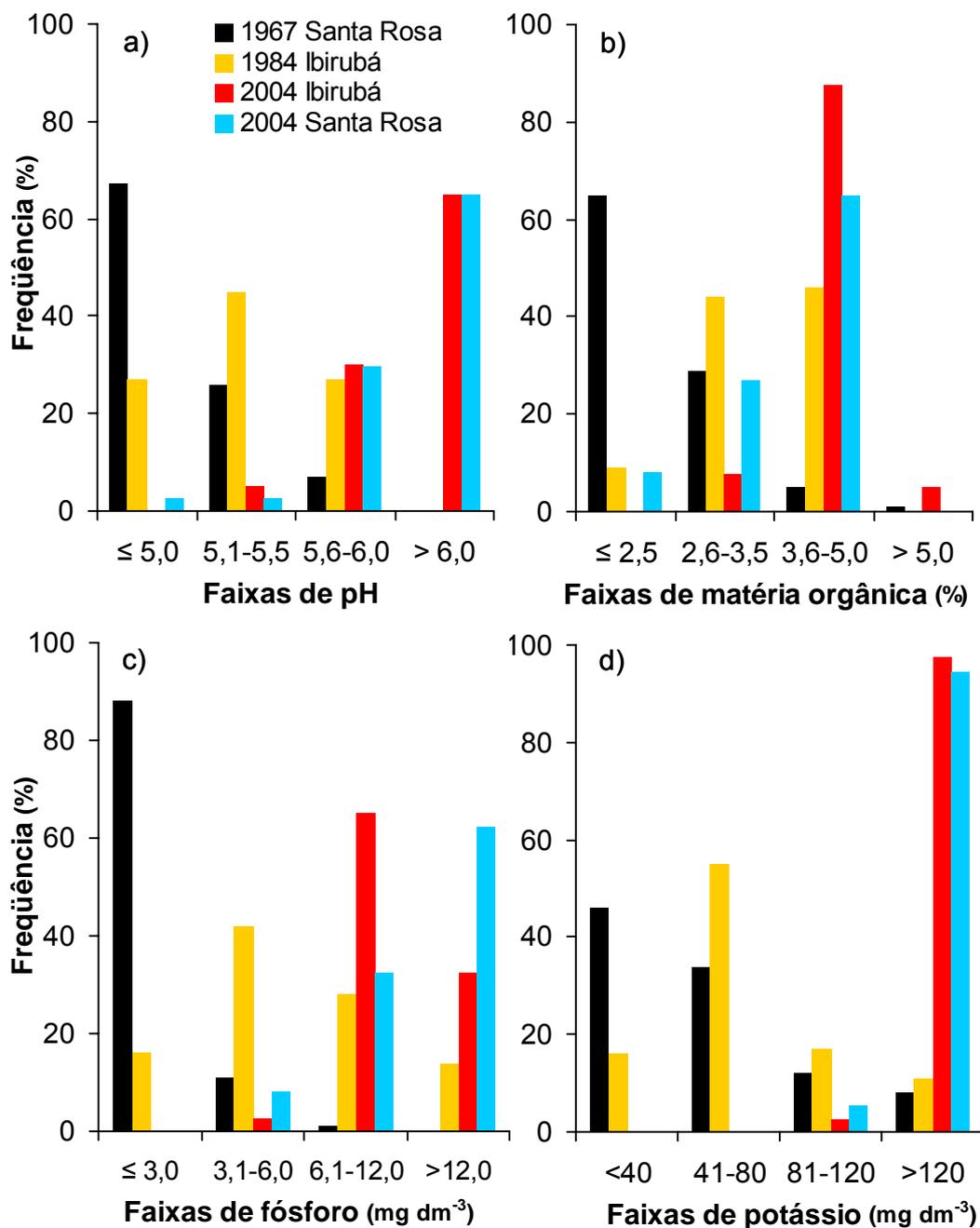
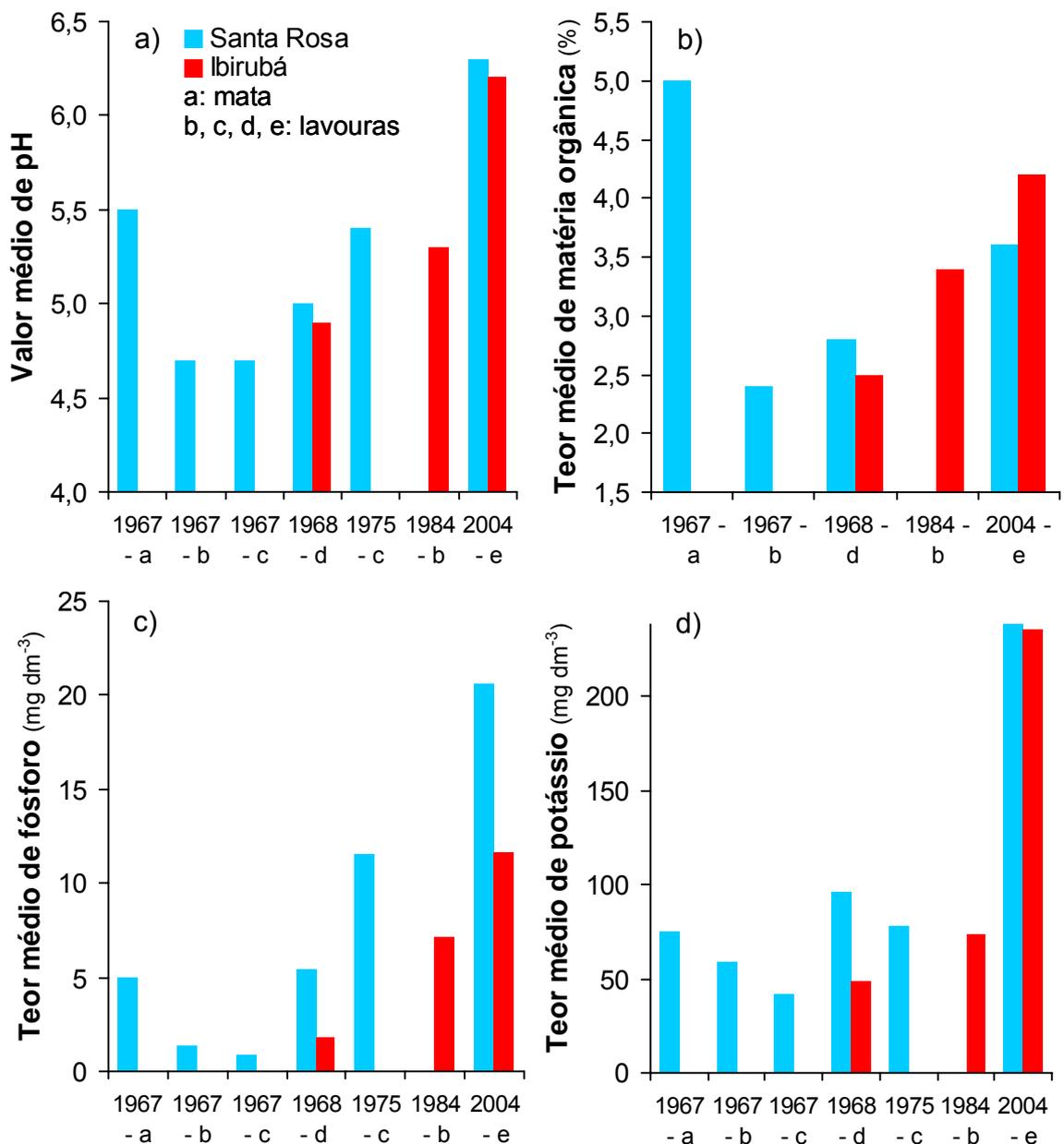


Figura 6. Evolução das faixas dos indicadores de fertilidade do solo — pH em água (a), matéria orgânica (b) e fósforo (c) e potássio disponíveis (d) — em Santa Rosa e em Ibirubá nas últimas quatro décadas.

O aumento nos teores de P disponível nos solos desses municípios também foi muito grande (Figura 6c). Em 1967, aproximadamente 90% dos solos avaliados tinham menos que 3 mg dm⁻³ de P; em 1984, apenas 20% das lavouras avaliadas em Ibirubá tinham teor menor que 3 mg dm⁻³; em 2004, mais de 95% dos solos avaliados tinham teores de P disponível maior de 6 mg dm⁻³ e em 65% deles o teor era maior que 12 mg dm⁻³, ou seja, acima da faixa

considerada adequada para os solos daquela região (teor de argila > 60%). Os teores de K disponível no solo não eram baixos como os de P (Figuras 6c e 6d). Em 1967, em quase 50% das lavouras avaliadas, o teor era menor que 40 mg dm^{-3} ; em 1984, em apenas 20% delas. Em 2004 somente em 5% dos solos o teor de K disponível era menor que 120 mg dm^{-3} (Figura 6d). A melhoria da fertilidade do solo nos últimos 40 anos também é expressa pelo aumento dos valores e dos teores médios destes indicadores (Figura 7).



Levantamentos de fertilidade do solo em diferentes épocas

Figura 7. Evolução dos valores e dos teores médios dos indicadores de fertilidade do solo — pH em água (a), matéria orgânica (b) e fósforo (c) e potássio disponíveis (d) — em Santa Rosa e Ibirubá [(a) e (c): Mielniczuk & Anghinoni (1976); (d) Porto (1970)].

O valor médio do pH dos solos em Santa Rosa aumentou de 4,7, em 1967, para 6,2, em 2004 (Figura 7a); a MO aumentou em, pelo menos, 50% no período avaliado, chegando a 4,2%, em média, em Ibirubá (Figura 7b). A mesma tendência é observada nos teores de P disponível (Figura 7c) em Santa Rosa, que passou de 1,3 mg dm⁻³, em 1967, para 20,6 mg dm⁻³ em 2004; e de K (Figura 7d), que era pouco maior que 50 mg dm⁻³, em 1967, e passou para 230 mg dm⁻³, em média, nos dois municípios em 2004.

A melhoria da fertilidade foi influenciada principalmente pelo conhecimento gerado e difundido pelas “Operações Tatu”, pelo projeto PIUCS, pelos CAT’s e pelo projeto METAS. A ação direta dos agricultores com a adubação e a correção da acidez do solo e a adoção de técnicas conservacionistas do solo, como o SPD com diversificação de espécies via rotação de culturas, resultou na melhoria da fertilidade e maior produtividade das culturas nos últimos 40 anos no RS (Figuras 4 e 8). Embora a melhoria da fertilidade do solo tenha sido verificada com a aplicação do conceito tradicional de fertilidade, esse conceito talvez não seja suficiente para expressar a fertilidade percebida pelas plantas, quando cultivadas após longo período sem revolvimento do solo e com rotação de culturas.

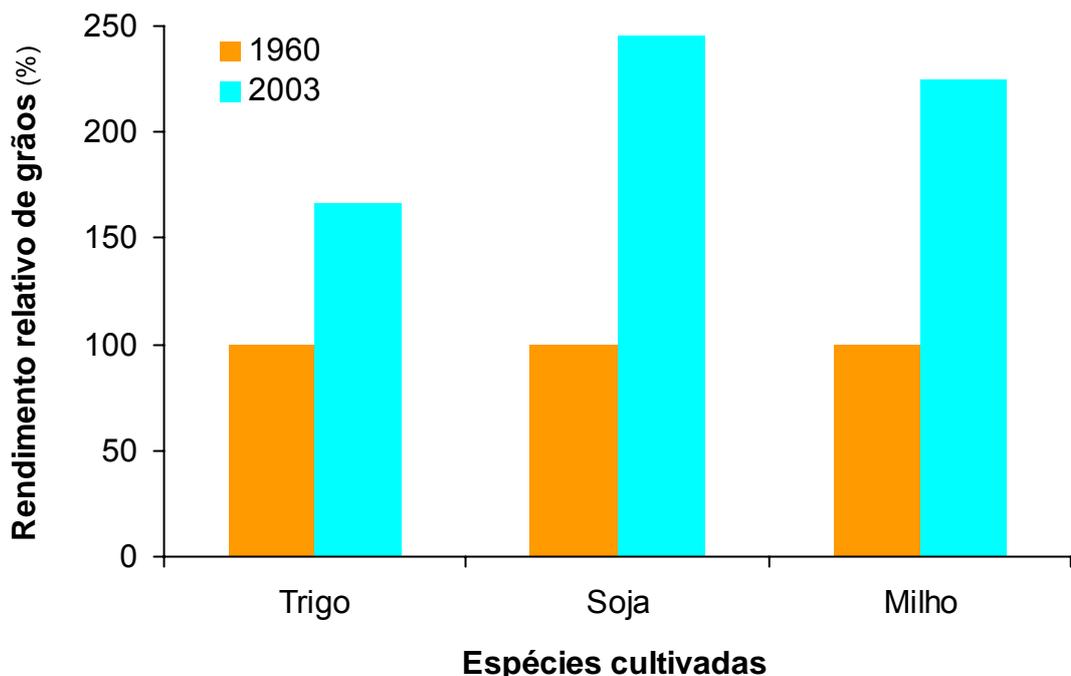


Figura 8. Rendimento relativo de grãos de trigo, soja e milho obtidos em 2003 no RS comparados àqueles de 1960 (Adaptado de EMATER, 2007).

3.2 A insuficiência do conceito tradicional para expressar a fertilidade do solo percebida pelas plantas

A partir da percepção que se tem de “algo” é definida a metodologia para a sua avaliação, que deve expressar com alto grau de confiabilidade essa percepção. A avaliação da fertilidade, definida com base no seu conceito tradicional (teoria mineralista), é feita pela interpretação de resultados de determinações químicas em amostras de solo. A partir dessa avaliação, são recomendados adubos e corretivos para corrigir, aumentar ou manter a fertilidade dos solos e, conseqüentemente, aumentar ou manter a produtividade das culturas. No RS, principalmente na região produtora de grãos, em que o solo é cultivado predominantemente no SPD há mais de 15 anos, verificou-se um importante aumento na fertilidade (Figuras 5, 6 e 7) e na produtividade das culturas (Figuras 4 e 8), com o tempo de cultivo desses solos. Contudo, é possível que o conceito tradicional e, conseqüentemente, sua avaliação sejam insuficientes para expressar a fertilidade percebida pelas plantas nesses solos.

Provavelmente, essa avaliação seja adequada para expressar a fertilidade do solo no SC, embora inclusive para este, haja necessidade de aprimoramento para expressar melhor a fertilidade do solo percebida pelas plantas. A sua adequabilidade para avaliação no SC deve estar muito relacionada aos efeitos do revolvimento do solo, destrói grande parte dos agregados, à queima da palha (resteva ou resíduos) das culturas, degrada rapidamente a MO e elimina parte dos organismos e microrganismos do solo, e ao repouso ou cultivo de trigo no inverno e de soja no verão, não adiciona palha suficiente para proteger o solo da erosão hídrica e manter ou aumentar sua MO. Por isso, no SC em que as condições físicas e biológicas do solo se alteram pouco no tempo, as culturas respondem bem à melhoria das condições químicas, especialmente às que são alteradas pela adição de nutrientes e pela correção da acidez.

Com a mudança do sistema de cultivo, do SC para o SPD, quatro variáveis se tornaram importantes: o próprio sistema de cultivo, a rotação de culturas adotada, o tempo contínuo de cultivo no sistema e o tipo de clima. Este, para a região produtora de grãos do RS, classificado como temperado úmido (Köeppen: “Cfa”), possibilita o cultivo de um grande número de espécies durante o ano, distribuídas em diferentes tipos de rotação de culturas. O SPD

preconiza o revolvimento do solo exclusivamente na linha de semeadura, a diversificação de espécies via rotação de culturas e a manutenção do solo permanentemente coberto, por palha (resíduos das culturas em decomposição) e/ou por plantas. Com o tempo de cultivo no SPD, são melhoradas as condições biológicas (Figura 9), físicas (Figura 10) e químicas (Figura 11) do solo.

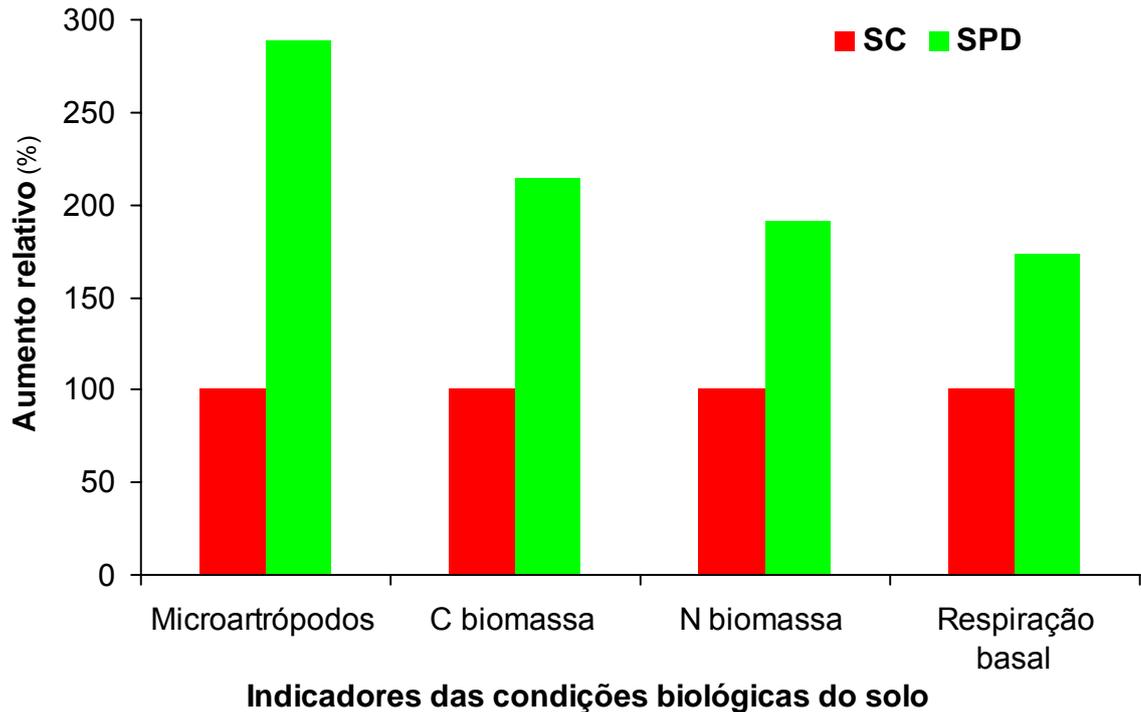


Figura 9. Mudança relativa de indicadores das condições biológicas do solo no SPD em relação ao SC em Londrina [avaliação feita aos 16 anos do experimento (LRd: 0-10 cm); adaptado de Balota et al. (1998)].

Verifica-se, principalmente no SPD, um aumento do erro — doravante chamado de “ruído”⁶ — nas diversas etapas de avaliação da fertilidade. O “ruído” diminui a confiabilidade na avaliação da fertilidade e restringe o seu uso, principalmente, nas lavouras melhor conduzidas, isto é, nos solos de maior fertilidade, esta entendida em sentido amplo. Isso conduz à reflexão sobre a validade da avaliação da fertilidade do solo e, conseqüentemente, sobre o seu conceito, principalmente, para solos cultivados no SPD.

⁶ Ruído, termo utilizado neste trabalho em substituição ao termo erro, por não ser exatamente um erro o que ocorre na avaliação da fertilidade, mas uma dificuldade em avaliar a expressão de um sistema de cultivo ao longo do tempo na produtividade das culturas.

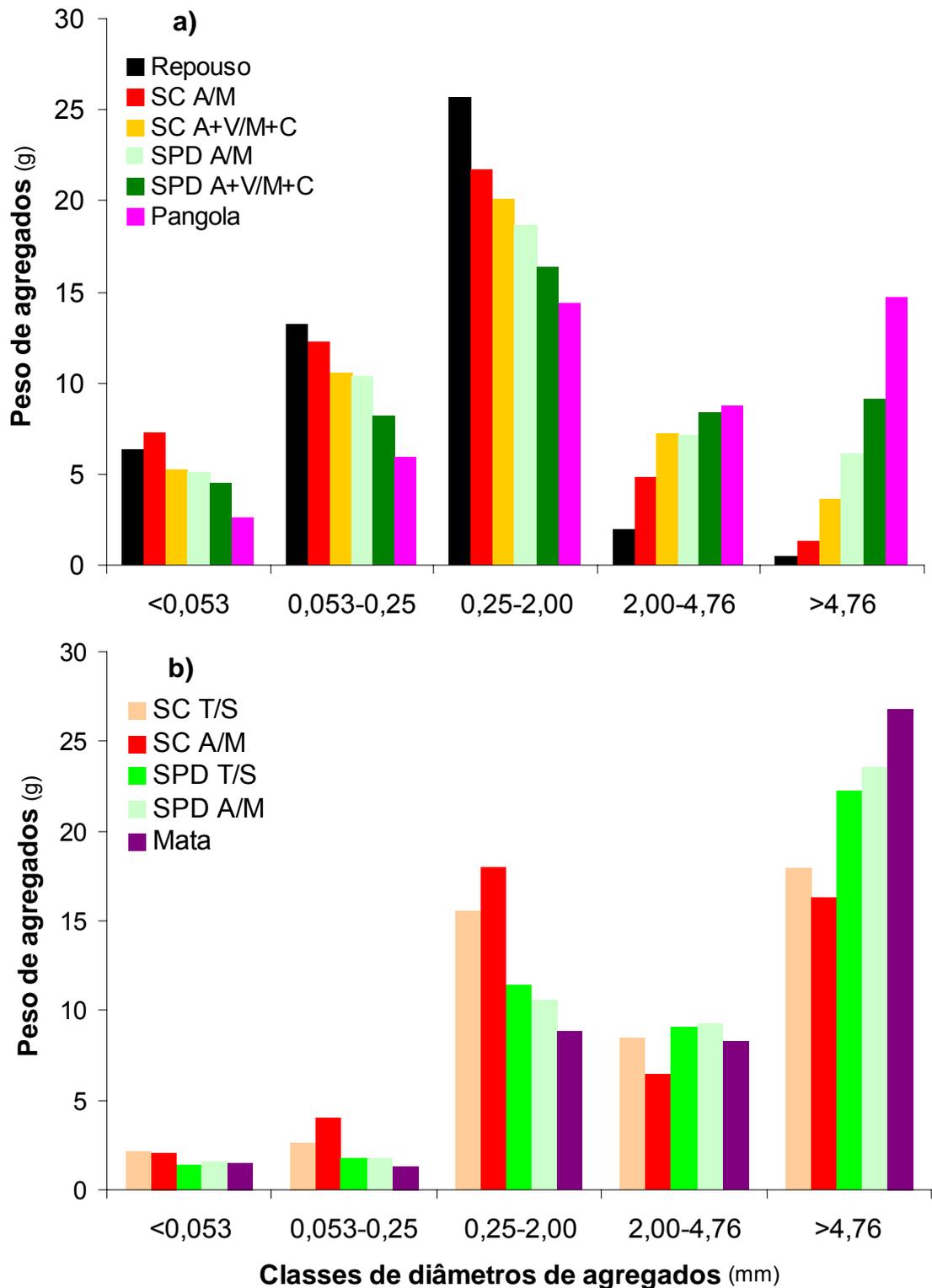


Figura 10. Distribuição das classes de diâmetros de agregados, na camada de 0-10 cm, em solo com diferentes históricos de cultivo em Eldorado do Sul (PVd: 0-10 cm) (a) e em Santo Ângelo (b) (LVdf: 0-10 cm) [avaliações feitas em experimentos conduzidos há mais de 20 anos; (b) Conceição (2006)].

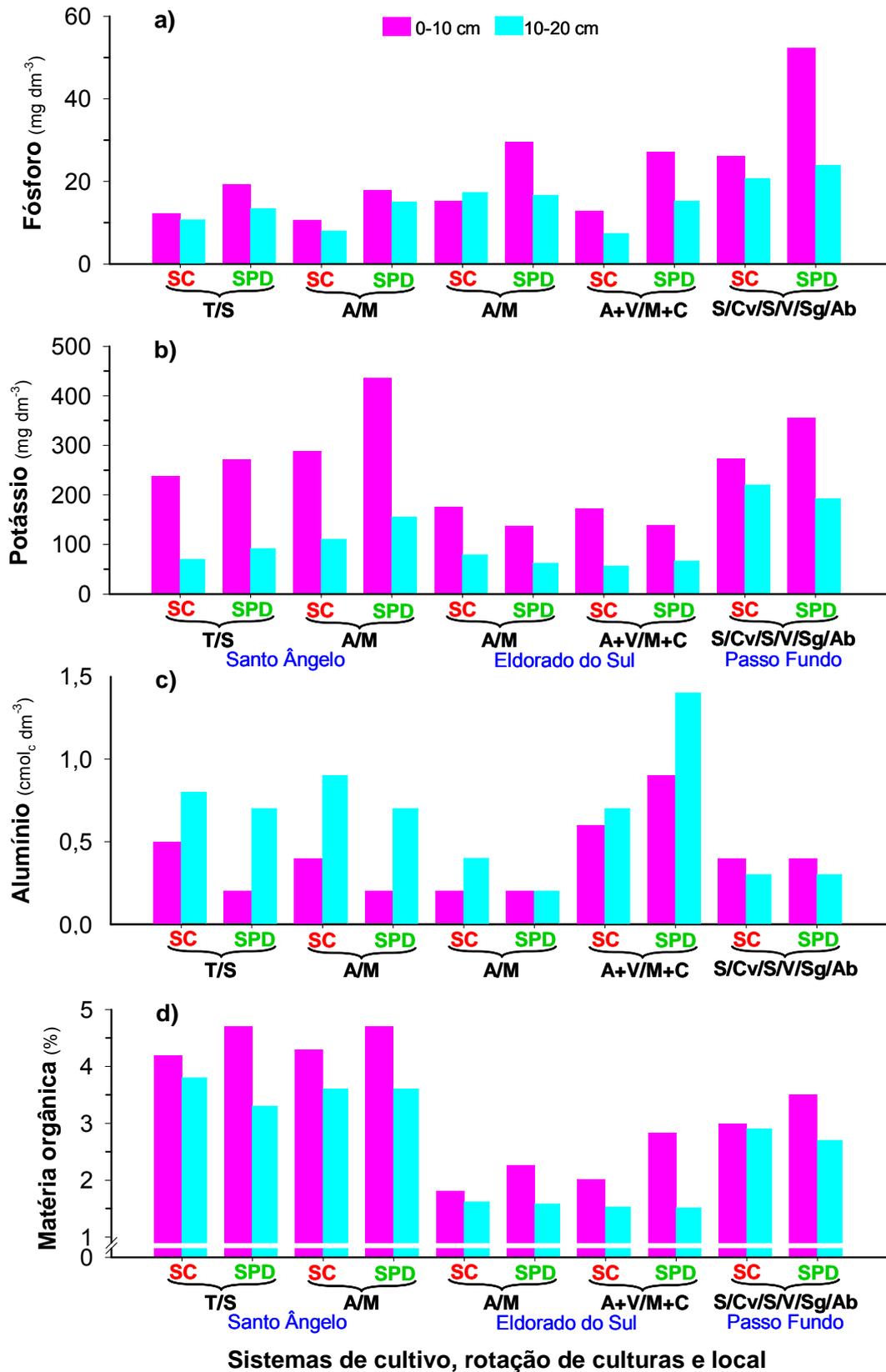


Figura 11. Mudança nos valores dos indicadores de fertilidade — fósforo (a) e potássio (b) disponíveis, alumínio trocável (c) e matéria orgânica (d) — em solos cultivados no SC e no SPD, com diferentes rotações de culturas em vários locais (avaliações feitas em experimentos conduzidos há mais de 20 anos; milho com adubação nitrogenada).

3.2.1 Relações clássicas da fertilidade do solo

As tendências centrais de algumas das relações clássicas entre os indicadores de fertilidade praticamente não foram alteradas com a mudança do SC para o SPD. Em experimentos conduzidos há mais de 20 anos em Eldorado do Sul (Figura 12; Material e métodos: Apêndice 2), à medida que o pH do solo aumentou o teor de Al trocável diminuiu (Figuras 12a). Entretanto observa-se que os resultados obtidos na camada de zero a 10 cm das parcelas no SC se distribuem mais a direita da figura, enquanto os obtidos em parcelas no SPD formam uma faixa ampla, distribuídos mais a esquerda do gráfico. Essa distribuição deve ser provavelmente inerente ou estar relacionada ao manejo do solo. Isso indica que, em um mesmo solo, para valores iguais de pH o teor de Al trocável pode ser diferente dependendo do sistema de cultivo e da rotação de culturas adotados. Na relação entre o pH e a V (Figura 12b) essas diferenças devidas aos sistemas de cultivo são menos evidentes e, na relação entre o Al trocável e m não são percebidas (Figura 12c). Nesses experimentos o rendimento médio do milho não diminuiu com o aumento de Al trocável e nem com a diminuição do pH (Figura 12a). Nas parcelas em que o pH era $\leq 4,6$ e o Al trocável $\geq 1,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (na figura 12a, circulado em vermelho) o rendimento médio de grãos de milho foi de $7,2 \text{ t ha}^{-1}$; com pH $\leq 5,1$ e Al trocável $\geq 0,6 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (na figura 12a, circulado em azul) foi de $6,4 \text{ t ha}^{-1}$; com pH $\leq 5,3$ e Al trocável $\geq 0,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (na figura 12a, circulado em verde) foi de $7,1 \text{ t ha}^{-1}$. A menor produtividade foi obtida com pH $\geq 5,5$ e zero de Al trocável (na figura 12a, circulado em rosa), média de $4,7 \text{ t ha}^{-1}$. Resultados semelhantes em SPD com freqüência são reportados na literatura (Salet & Anghinoni, 1998; Vieira, 2007).

Recentemente, inúmeros pesquisadores (Salet, 1998; Diekow, 2003; Zanatta, 2006; entre outros) relatam que a MO tem a capacidade de complexar o Al trocável, reduzindo a sua atividade na solução do solo e, conseqüentemente, sua toxidez para as plantas. Isso indica que no SPD poderia haver uma relação inversa entre teor de MO e Al trocável, entretanto nenhuma tendência clara foi observada nesses experimentos (Figura 12d). Nesses, conduzidos em argissolo (PVd), o teor de MO nas parcelas no SC é baixo ($< 2\%$) (Figura 12d). No entanto, no SPD, o seu teor é maior e dependente do tipo de rotação de culturas e da adubação nitrogenada feita no milho. A aplicação de nitrogênio (N) resulta em aumento da produtividade de

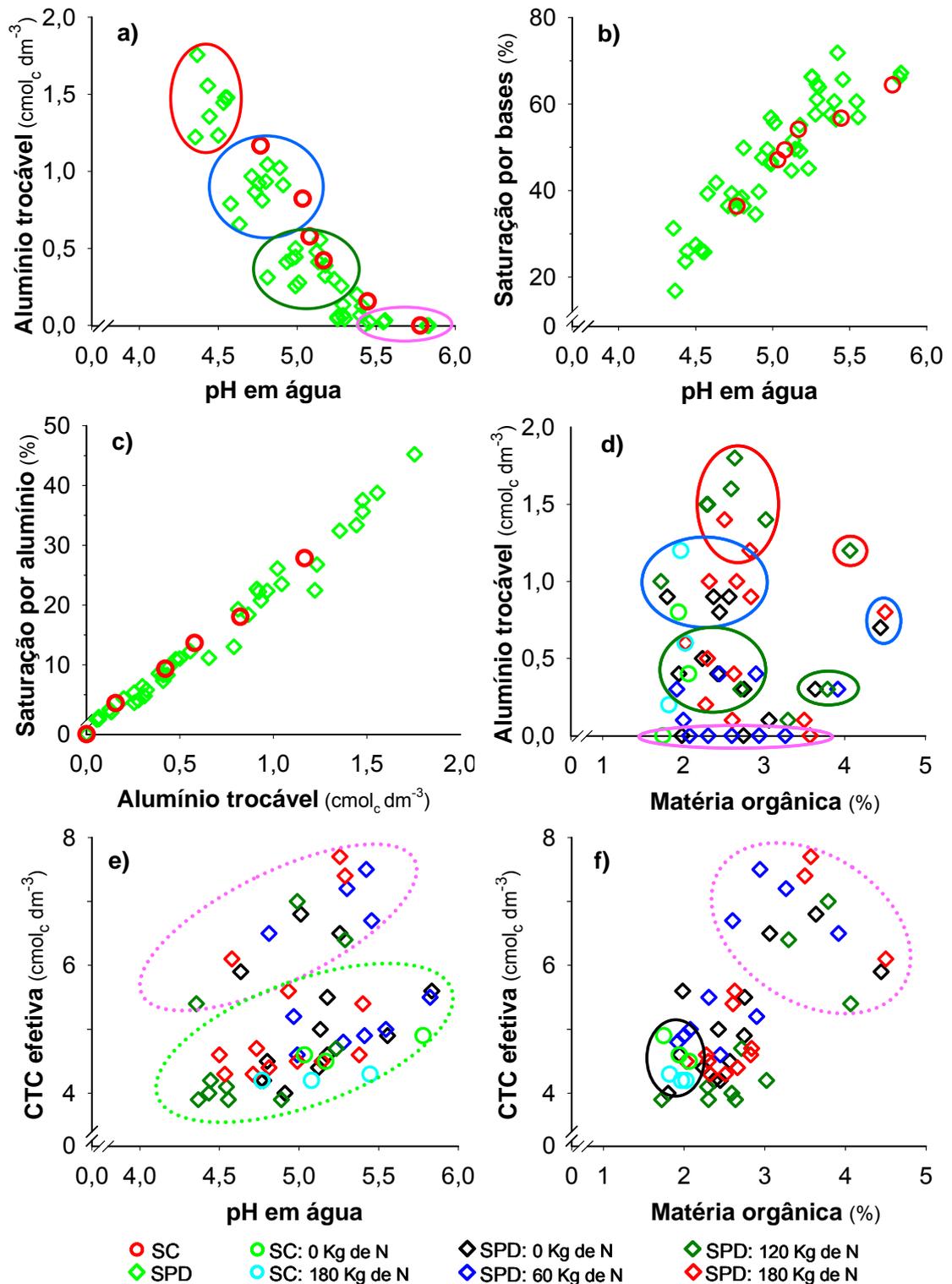


Figura 12. Relações clássicas entre indicadores de fertilidade — pH em água e alumínio trocável (a) e saturação por bases (b), alumínio trocável e saturação por alumínio (c), matéria orgânica e alumínio trocável (d), pH em água e CTC efetiva (e) e matéria orgânica e CTC efetiva (f) — em experimentos com diferentes históricos de cultivo, conduzidos há mais de 20 anos em Eldorado do Sul (PVd: 0-10 cm).

milho e em maior quantidade de carbono (C) incorporado ao sistema. Em alguns tratamentos o teor de C duplicou em 20 anos de SPD. Também é possível observar que o grupo de pontos com teor de Al trocável maior (Figura 12a) não é o que tem teor menor de MO (Figura 12d). A maior produtividade média de milho ($7,2 \text{ t ha}^{-1}$; na Figura 12a, circulado em vermelho), obtida com o maior teor médio de Al trocável, indica que no SPD, a importância de um componente isolado pode ser menor. Nesse caso, o efeito da rotação no aumento e no tipo de MO inibe ou diminui a ação do Al sobre as plantas.

As relações entre pH e CTC efetiva e entre esta e a MO são também influenciadas pelo teor de argila dos solos. Mas num mesmo tipo de solo, com teor de argila entre 26 e 40%, é possível separar a CTC efetiva em dois conjuntos de pontos para a mesma faixa de pH (Figura 12e). O conjunto de pontos com o maior valor médio de CTC efetiva ($6,7 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; na Figura 12e, circulado em rosa) tem sua posição deslocada para a direita devido ao maior teor de MO (na Figura 12f, circulado em rosa). Os menores valores médios de CTC efetiva são observados no SC ($4,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), cujos teores de MO são baixos (na Figura 12f, circulado em preto).

A alta relação observada entre os teores de N total e mineral do solo nesses experimentos (Figura 13a) foi influenciada pelo sistema de cultivo, pela rotação de culturas e pela adubação nitrogenada no cultivo do milho. Em geral, isso não ocorre com frequência. A causa pode ter sido a pouca precipitação no período de cultivo, em que o N mineral, mesmo com irrigação, deve ter permanecido na zona de absorção das raízes. Ao analisar somente os pontos dos tratamentos no SC, parece não haver relação entre N total e N mineral. Porém, há uma alta relação entre os teores de MO e os de N total no solo (Figura 13b), o que é sempre esperado devido à relação C:N da MO. Contudo, nesses experimentos o grau de associação é maior, por ser somente um tipo de solo com grande amplitude nos teores, devido às quantidades de N aplicadas ao milho, as diferentes espécies na rotação e ao tempo de cultivo.

Nas relações entre teor de P ou K disponíveis no solo e concentração destes no tecido de plantas há, em geral, um elevado grau de associação dos valores. Isso não é verdadeiro, quando os teores no solo estão acima do teor crítico. Acima deste teor, a concentração no tecido depende de inúmeros outros fatores que influenciam na capacidade absorptiva das raízes.

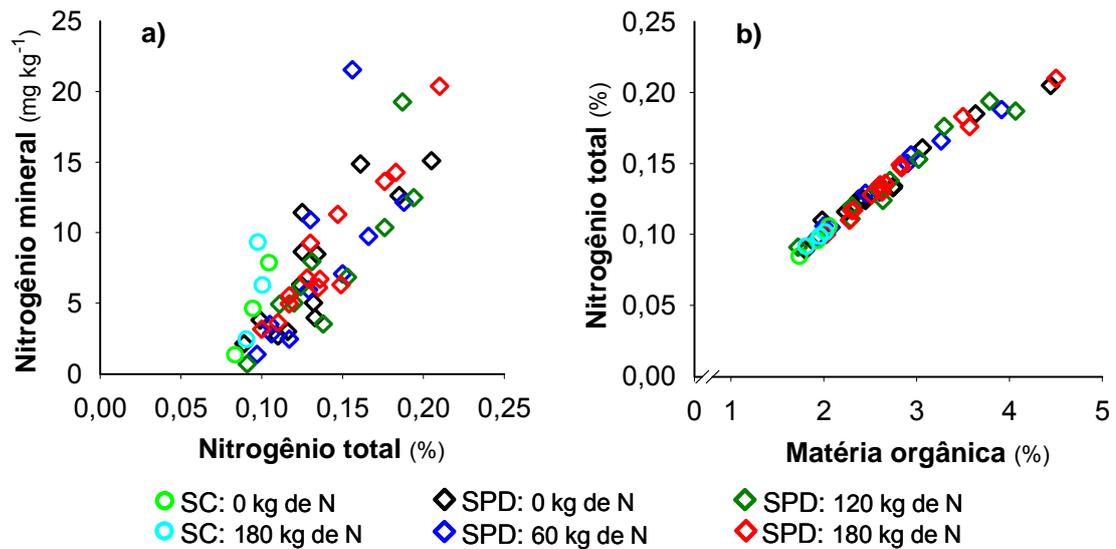


Figura 13. Relações entre nitrogênio total e mineral (a) e entre matéria orgânica e nitrogênio total (b) no solo em experimentos conduzidos há mais de 20 anos em Eldorado do Sul (PVd: 0-10 cm).

Assim, para o conjunto de pontos correspondente a solos com teor de argila maior que 55%, o teor crítico de P (Mehlich 1) é 6,0 mg/dm³ (Figura 14a), avaliados em seis lavouras conduzidas há mais de cinco anos no SPD (Material e métodos: Apêndice 3). Em apenas um dos pontos avaliados, o teor de P estava abaixo do valor crítico. Observa-se que para solos com esses teores, a concentração de P no tecido da soja é maior que 0,25%, dentro da faixa de concentração considerada adequada ao seu pleno desenvolvimento (Malavolta et al., 1997). Houve, no entanto, um aumento na concentração à medida que aumentou o teor de P disponível no solo. Comportamento semelhante não foi observado em solos com teor de argila entre 40-55% (Figura 14a). Nesse caso, o teor de P no tecido da soja é inferior a 0,25%, mesmo com teores maiores que o valor crítico estabelecido para esses solos (9,0 mg/dm³ – Mehlich 1).

Em geral, conforme a teoria mineralista de Liebig, a produtividade de uma planta é proporcional ao nutriente que se encontra em quantidade mínima no solo. Nas Figuras 14a e 14b, foram utilizados somente os pontos cujos fatores que compõem a avaliação de fertilidade, além de P e K, estivessem em condições adequadas para as plantas, nesses locais o rendimento de soja obtido variou de 70 a 100%. Observa-se, também, que para o mesmo teor de P ou K no solo é possível ter 70 ou 100% de rendimento. Nessa faixa, a

produtividade de soja foi influenciada, provavelmente, por outro fator ou conjunto de fatores. É possível que o efeito do manejo e das condições físicas e/ou biológicas do solo e do tempo de cultivo no SPD, tenha influenciado mais que os indicadores utilizados para avaliar a fertilidade do solo. Esse é um exemplo da aplicação do conceito mineralista de fertilidade, isto é, a capacidade de um solo fornecer nutrientes em quantidades e proporção adequadas às plantas quando os outros fatores não são limitantes.

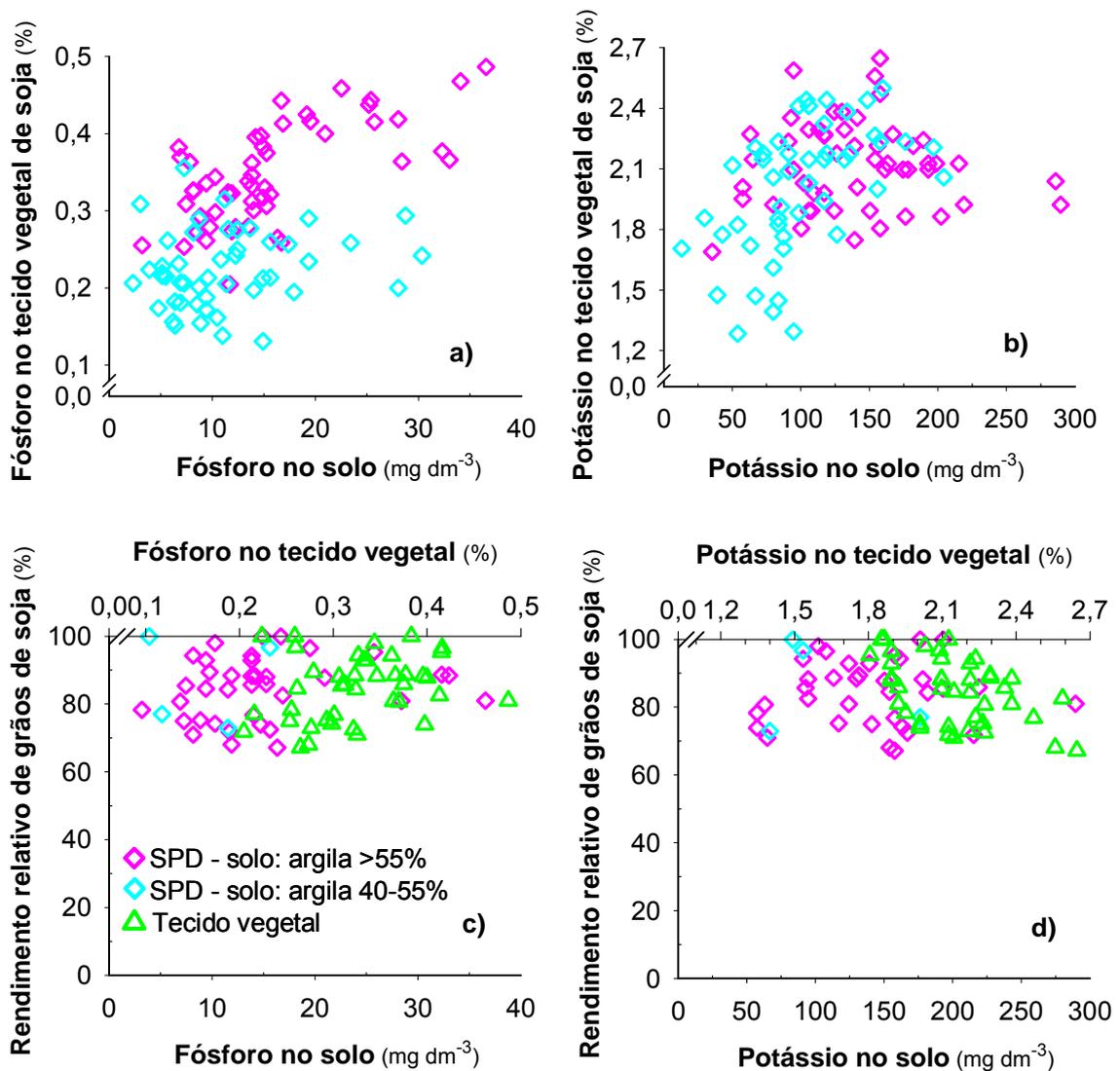


Figura 14. Relações entre o teor de fósforo (a) e potássio disponíveis (b) no solo e sua concentração no tecido vegetal e entre essas e o rendimento relativo de grãos de soja (c) e (d) em lavouras cultivadas no SPD no Planalto Médio [LVd: 0-10 cm; (c) $\text{pH} \geq 5,5$; $V \geq 65\%$ e $K \geq 60 \text{ mg dm}^{-3}$; (d) $\text{pH} \geq 5,5$; $V \geq 65\%$ e $P \geq 6 \text{ mg dm}^{-3}$].

No SC de cultivo, é muito raro se observar altos rendimentos quando os indicadores tradicionais de fertilidade (pH , P, K e MO) são baixos ou quando

o teor de Al trocável é alto. No entanto, nos últimos anos, inúmeros experimentos e resultados de lavoura têm mostrado isso no SPD. Embora muitos dos pesquisadores em fertilidade do solo atribuam isso a casualidades, prefere-se, neste trabalho, atribuir às modificações que ocorrem no solo com o tempo de cultivo no SPD. Nos dados, avaliados em seis lavouras conduzidas no SPD há mais de cinco anos no Planalto Médio do RS, apresentados na Figura 15 (Material e métodos: Apêndice 3), selecionaram-se três pontos para representar o que foi descrito. Num dos pontos (na Figura 15, destacado com quadrado vermelho), o pH é próximo de 6,0, o valor V próximo a 80%, o teor de MO maior que 2,5% e os teores de P e K disponíveis são altos. Por esta interpretação, esse solo seria considerado adequado ao desenvolvimento da maior parte das culturas e, não havendo impedimentos devido a outros fatores (falta de umidade, ataque de moléstias, intempéries), a cultura poderia expressar ao máximo seu potencial genético. Verifica-se, no entanto, que o rendimento de soja correspondente a esse ponto foi aproximadamente 75% do máximo obtido naquelas condições, isto é, fertilidade alta correspondeu a rendimento baixo. Em contraponto, para o mesmo tipo de solo e condições climáticas, o rendimento foi máximo em um ponto com teor menor de MO, teor de K disponível abaixo do teor considerado crítico pela CQFS RS/SC (2004), pH menor que 5 e m de 5% (na Figura 15, destacado com círculo vermelho), isto é, fertilidade baixa correspondeu a rendimento alto. Este, pelo conceito mineralista de fertilidade do solo, deveria ter a acidez corrigida e o teor de K elevado até o valor crítico. Entretanto, também são encontradas as situações esperadas: fertilidade alta e rendimento alto (na Figura 15, destacado com quadrilátero vermelho). É possível que a avaliação tradicional seja menos eficiente para avaliar a fertilidade dos solos cultivados no SPD. Isso pode ser percebido pelo aumento do “ruído”, em relação ao SC, nas suas etapas.

3.2.2. “Ruído” nas etapas do processo de avaliação da fertilidade nos solos cultivados no sistema plantio direto

As mudanças verificadas principalmente nas relações entre os indicadores de fertilidade do solo e o rendimento das culturas e o aumento do “ruído” nas etapas do processo de avaliação de fertilidade são causados pelos mesmos fatores. Atualmente, a avaliação da fertilidade dos solos cultivados no

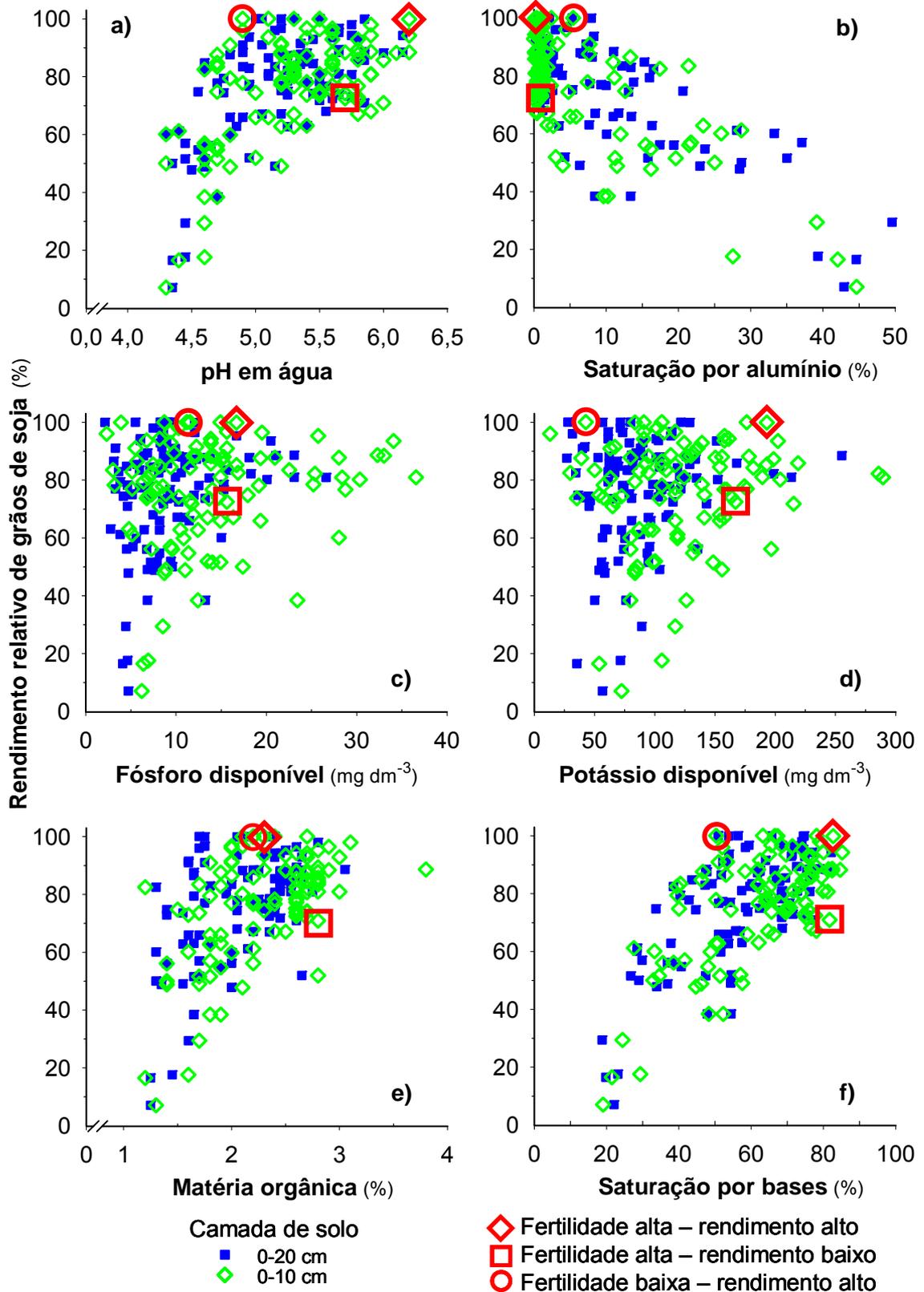


Figura 15. Relações entre indicadores da fertilidade do solo e rendimento relativo de grãos de soja em lavouras cultivadas no SPD no Planalto Médio do RS (LVd: 0-10 e 0-20 cm).

SPD é feita com base num sistema construído para o SC. Neste, as práticas de manejo que interferem na fertilidade se referem ao grau e à frequência do revolvimento do solo e ao manejo dos resíduos das culturas. Recomenda-se, neste sistema, o revolvimento da camada 0-20 cm de solo; na região do Planalto do RS, em geral, é realizado duas vezes ao ano e, com frequência é queimada a palha. No SPD, o revolvimento ocorre somente na linha de semeadura, a palha é mantida na superfície e a rotação de culturas é indispensável. Ao comparar esses dois sistemas, se observa que no caso do SC, o solo retorna ao mesmo estado a cada seis meses (se forem feitos dois cultivos por ano). No tempo, as condições físicas e biológicas permanecem muito semelhantes, sendo alteradas somente as químicas pela adubação e pela calagem. No SPD, as mudanças nas condições físicas, biológicas e químicas, pela ausência de perturbações, evoluem normalmente melhorando com os anos de cultivo do solo nesse sistema (Figuras 9, 10 e 11).

O “ruído” na avaliação da fertilidade sempre existiu, porém a sua magnitude aumentou no SPD devido a inúmeros fatores isolados ou por efeito em cascata em que a alteração de um fator influencia uma série deles, geralmente não considerados na sua avaliação. Entre os principais fatores, talvez o mais importante por desencadear uma série de eventos, está o não revolvimento do solo, ou melhor, o revolvimento apenas na linha de semeadura. Por essa prática, há a manutenção da palha na superfície, a aplicação de fertilizantes é feita na linha de semeadura e o calcário aplicado na superfície não é incorporado ao solo. Assim, o não revolvimento propicia alteração significativa na estrutura e nos gradientes dos indicadores químicos e biológicos do solo. Isso altera o tipo de relação e o seu efeito sobre o desenvolvimento e a produtividade das plantas. É bem possível que os benefícios desse sistema, tanto para o solo como para o desenvolvimento das plantas, não sejam contemplados pela avaliação química tradicional da fertilidade sendo percebidos como “ruídos” e não como benefícios (Figura 15).

O aumento do “ruído” ocorre na amostragem de solo e nas determinações químicas, na calibração e na interpretação dos resultados das análises. É importante a noção exata do grau da interferência do aumento do “ruído” na avaliação, para saber se é suficiente adaptá-la ou se é necessário

desenvolver uma nova metodologia de avaliação, a partir de outro conceito da fertilidade para o cultivo do solo no SPD.

Na etapa da amostragem o “ruído” da avaliação pode ser corrigido ou diminuído. Para esta, já foram desenvolvidos procedimentos que podem solucionar, em parte, o problema, porém são muito laboriosos. Nas determinações químicas, a solução é tanto mais complicada quanto melhor for a agregação do solo. Esta é uma das vantagens do SPD (Figura 10) bem conduzido, mas é anulada na avaliação. Um solo em repouso ou cultivado no SC tem menor proporção de agregados nas classes de diâmetro maior (2,00-4,76 e >4,76 mm) do que um no SPD, com mata ou com pastagem (Figura 10). Quanto maior o número de espécies utilizadas na rotação de culturas e a quantidade e a qualidade do material orgânico adicionado ao solo melhor será a sua agregação para um mesmo sistema de cultivo. Embora esta melhore o ambiente para a vida das plantas (disponibilidade e acesso aos nutrientes, retenção de água etc.), aumenta o “ruído”, porque o sistema de avaliação da fertilidade foi desenvolvido para avaliar o solo revolvido, totalmente desagregado.

Nas determinações químicas, a condição básica é o destorroamento da amostra por moagem mecânica do solo. A análise se processa sempre em amostras moídas e tamisadas em peneiras com malha de 2 mm de diâmetro. Por isso, num solo com maior porosidade e melhor estruturado, há menos massa sólida num mesmo volume no campo do que depois de moído e tamisado no laboratório. Por conseqüência, nessa condição, terá um valor maior de nutriente, o que não corresponde à realidade no campo. Para a planta, o maior espaço poroso é vantajoso para o seu desenvolvimento e absorção dos nutrientes disponíveis no solo. Assim, o mesmo valor de um indicador, determinado quimicamente num solo melhor estruturado e com maior atividade biológica, tem efeito diferente sobre as plantas do que num solo compactado, cuja atividade biológica é provavelmente baixa. O aumento do “ruído” nessa etapa da avaliação prejudica diretamente a interpretação dos resultados e diminui a confiabilidade nas recomendações para melhorar a fertilidade do solo. Não existe, ainda, uma solução para o problema, nem tampouco estão sendo conduzidos estudos relacionados a esse tópico. Isso também implicará em mudanças na metodologia de amostragem e de manuseio do solo e no desenvolvimento de outro tipo de calibração.

Na etapa da calibração, são definidos os teores críticos e os limites das faixas de interpretação dos indicadores de fertilidade com base na dispersão natural dos pontos que representam os locais avaliados. No caso da calibração de P, o “ruído” verificado, há mais de 30 anos, mesmo após a separação dos pontos em grupos conforme o teor de argila (argilosos e arenosos) (Figura 16), era alto. Observa-se, pela dispersão dos pontos, que para um teor de 5 mg dm^{-3} de P nos solos argilosos, por exemplo, foram obtidos rendimentos relativos muito diferentes, próximos a 40%, a 65% e a 80% (na Figura 16, destacados com quadrados vermelhos) do rendimento máximo. A esse “ruído básico” da calibração — características específicas de cada solo, entre elas MO, das condições ambientais e das variedades utilizadas nas safras avaliadas — nos solos cultivados no SPD, somam-se, principalmente, as influências das diferentes rotações de culturas adotadas e das relações estabelecidas com o tempo de cultivo, que interferem nas relações entre o rendimento relativo e o teor dos nutrientes determinados quimicamente nas amostras de solo. Entretanto, no estabelecimento do teor crítico e na distribuição das faixas de interpretação adotadas pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo para as recomendações de adubação (CQFS RS/SC, 2004), esses fatores não foram considerados, uma vez que a calibração atualmente utilizada foi feita no SC.

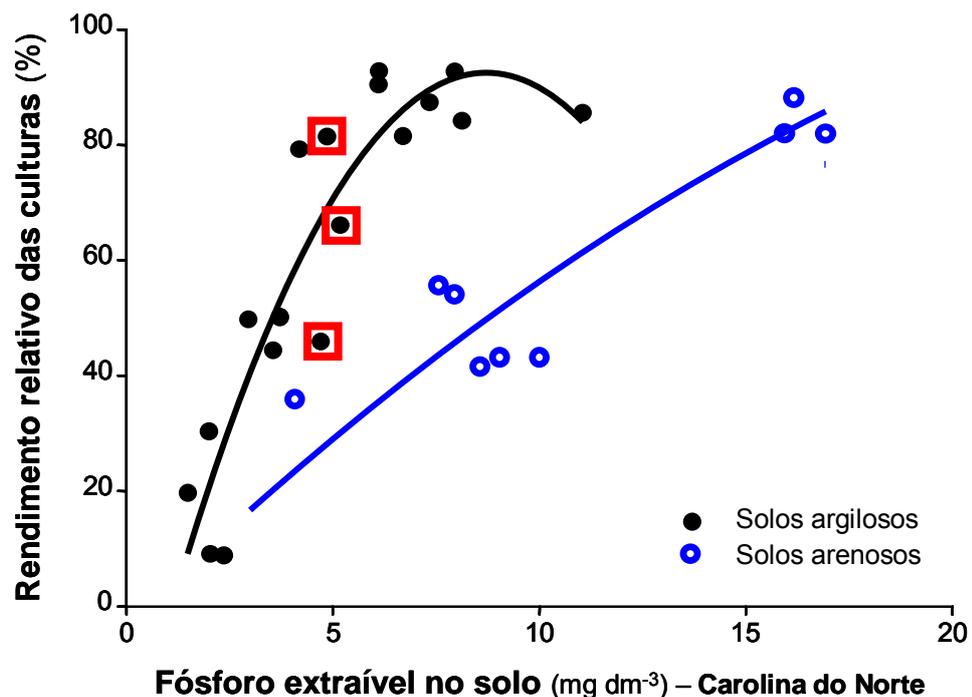


Figura 16. Curvas de calibração para fósforo extraível pelo método Carolina do Norte no solo cultivado no SC (Mielniczuk et al., 1969).

Na curva de calibração de P em solos cultivados no SPD (Figura 17), a dispersão dos pontos demonstra ainda um grande “ruído” nesta etapa do processo de avaliação da fertilidade do solo, independentemente do método de determinação utilizado, Mehlich 1 (Figura 17a) ou resina (Figura 17b) ou separação por classe textural. Entretanto, verifica-se o aumento no valor do teor crítico de P no solo, determinado pelo Mehlich 1, de 6,0 para aproximadamente 12 mg dm⁻³ para a classe I e de 9 e 12 para 30 mg dm⁻³ para as classes de argila II e III, respectivamente, que são maiores do que os adotados no Manual de Adubação e de Calagem (CQFS RS/SC, 2004). Isso pode ser observado pelas faixas de interpretação adotadas no Manual para a Classe I sobrepostas aos resultados obtidos na calibração feita por Schlindwein (2003) (Figura 17a). Este mesmo comportamento é verificado na calibração do método da resina trocadora de íons (Figura 17b). Este conjunto de pontos indica que o rendimento relativo máximo está relacionado a um determinado teor de nutriente no solo, porém, o “ruído” é muito alto e gera incerteza na definição do teor crítico, no estabelecimento das faixas de interpretação dos resultados para as análises de solo e, conseqüentemente, na avaliação da fertilidade dos solos cultivados no SPD.

O “ruído” na etapa de interpretação dos resultados também é conseqüência das etapas anteriores. Este foi verificado nos resultados obtidos em lavouras (Figura 15) e em experimentos. Nos experimentos conduzidos em há mais de 20 anos em Eldorado do Sul (Figura 18), é possível observar com maior intensidade o “ruído” em inúmeras combinações de sistemas de cultivo e de rotações de culturas. Os resultados desses indicam que as diferenças no rendimento de grãos do milho são devidas mais ao histórico do cultivo, ou seja, sistemas de cultivo, rotação, adubação e à interação destes do que aos indicadores das condições químicas de solo. Nas relações entre os indicadores tradicionais da fertilidade e o rendimento de grãos (Figura 18), pode-se observar a inadequabilidade de alguns indicadores, considerados imprescindíveis no SC, para avaliar a fertilidade do solo no SPD. Por exemplo, um solo de fertilidade alta (argila = 21 - 40%; pH = 5,4; Al trocável = 0,2 cmol_c dm⁻³; m = 4%; V = 57%; MO = 1,8%; P = 15 mg dm⁻³; K = 176 mg dm⁻³ — na Figura 18, destacado com quadrado rosa), cultivado no SC com rotação A/M e adubação nitrogenada (180 kg ha⁻¹ de N), deveria produzir pelo menos 90% do rendimento máximo

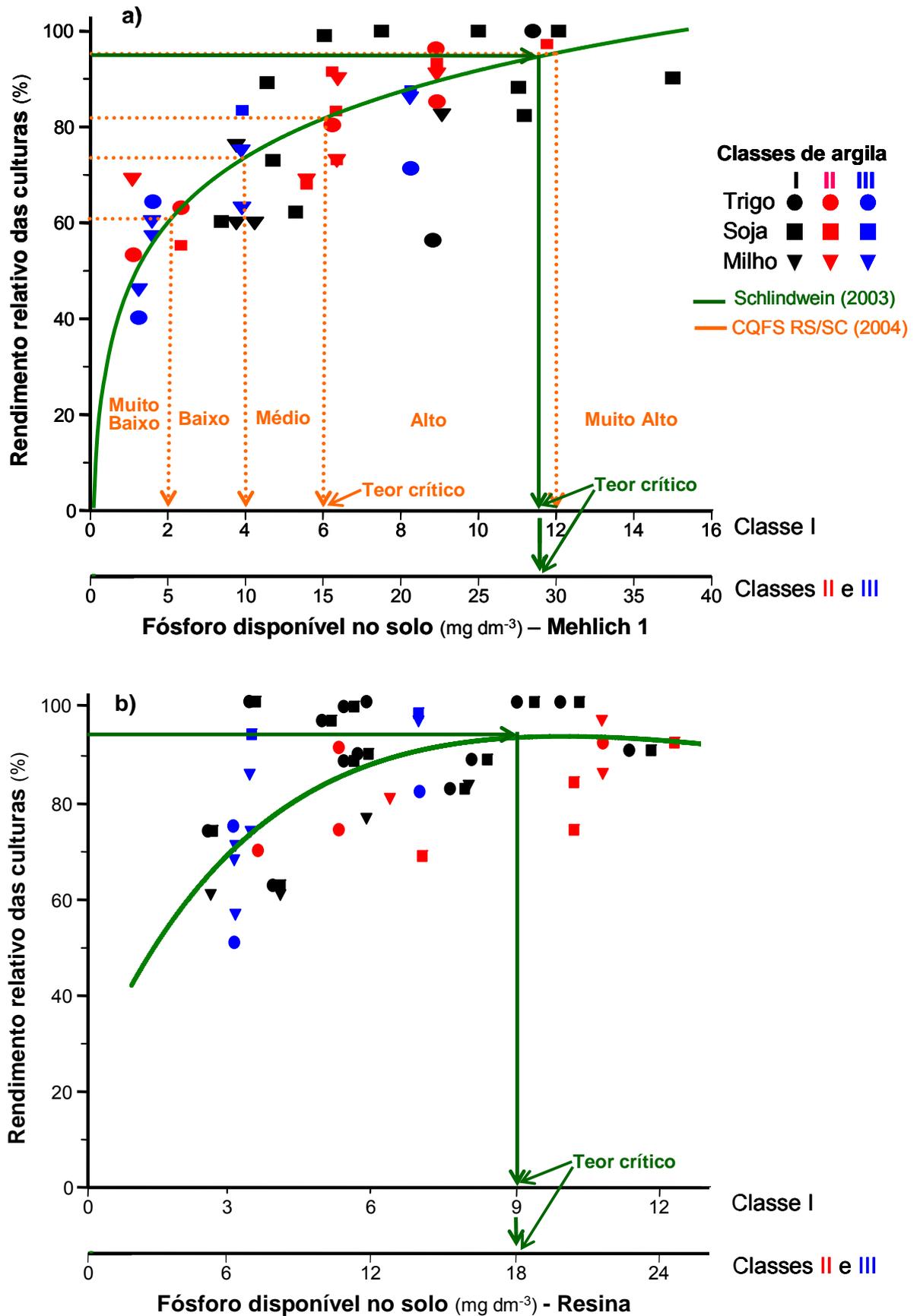


Figura 17. Curvas de calibração para fósforo disponível — Mehlich 1 (a) e resina (b) — em solos cultivados no SPD [Adaptado de Schlindwein (2003) com as faixas de interpretação adotadas pela CQFS RS/SC (2004)].

(correspondente a 10 t ha^{-1} de grãos de milho nesses experimentos). No entanto, esse solo produziu menos de 6 t ha^{-1} de grãos de milho, isto é, à fertilidade alta correspondeu produtividade baixa. No mesmo solo, com fertilidade semelhante ao anterior ($\text{pH} = 5,4$; $\text{Al trocável} = 0,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $m = 4\%$; $V = 58\%$; $\text{MO} = 2,3\%$; $P = 30 \text{ mg dm}^{-3}$; $K = 136 \text{ mg dm}^{-3}$ — na Figura 18, destacado com quadrado azul), mesma rotação e adubação, porém cultivado no SPD, produziu quase 10 t ha^{-1} de milho, isto é, fertilidade alta correspondeu à produtividade alta. Também são verificadas situações de fertilidade do solo baixa, em que é obtida produtividade alta, como pode ser observado no SPD A+V/M+C com adubação nitrogenada ($\text{pH} = 4,5$; $\text{Al trocável} = 1,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $m = 27\%$; $V = 28\%$; $\text{MO} = 2,8\%$; $P = 18 \text{ mg dm}^{-3}$; $K = 207 \text{ mg dm}^{-3}$ — na Figura 18, destacado com triângulo azul), que produziu mais de 8 t ha^{-1} de milho. O mesmo comportamento foi verificado no SPD G/M sem adubação nitrogenada ($\text{pH} = 4,6$; $\text{Al trocável} = 0,7 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $m = 11\%$; $V = 42\%$; $\text{MO} = 4,5\%$; $P = 38 \text{ mg dm}^{-3}$; $K = 217 \text{ mg dm}^{-3}$ — na Figura 18, destacado com quadrilátero laranja) e com adubação nitrogenada ($\text{pH} = 4,6$; $\text{Al trocável} = 0,8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $m = 13\%$; $V = 39\%$; $\text{MO} = 4,4\%$; $P = 33 \text{ mg dm}^{-3}$; $K = 241 \text{ mg dm}^{-3}$ — na Figura 18, destacado com quadrilátero azul), que produziram $9,2$ e $8,8 \text{ t ha}^{-1}$, respectivamente.

Os indicadores tradicionais nem sempre expressam a fertilidade do solo percebida pelas plantas com a mudança de sistema de cultivo. Isso pode ser visto comparando a rotação A/V com 180 kg ha^{-1} de N cultivada no SC e no SPD. Cultivado no SC, com fertilidade do solo baixa ($\text{pH} = 4,8$; $\text{Al trocável} = 1,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $m = 28\%$; $V = 36\%$; $\text{MO} = 2,0\%$; $P = 11 \text{ mg dm}^{-3}$; $K = 139 \text{ mg dm}^{-3}$ — na Figura 18, destacado com círculo rosa), o rendimento foi de $6,9 \text{ t ha}^{-1}$; e no SPD ($\text{pH} = 4,8$; $\text{Al trocável} = 1,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $m = 24\%$; $V = 36\%$; $\text{MO} = 2,7\%$; $P = 21 \text{ mg dm}^{-3}$; $K = 168 \text{ mg dm}^{-3}$ — na Figura 18, destacado com círculo azul) $9,4 \text{ t ha}^{-1}$.

Nos exemplos mostrados, verifica-se que o histórico e o sistema de cultivo são mais importantes na definição da produtividade das culturas do que os valores dos indicadores de fertilidade, tradicionalmente avaliados. A inclusão de outros indicadores possíveis de serem determinados não melhorou a avaliação da fertilidade do solo (Figura 19). Por isso, a noção mineralista da fertilidade, amplamente utilizada para solos cultivados no SC, pode não ser válida para solos cultivados há muitos anos no SPD e nem para todas as rotações de culturas utilizadas no RS (Figuras 15, 17, 18 e 19).

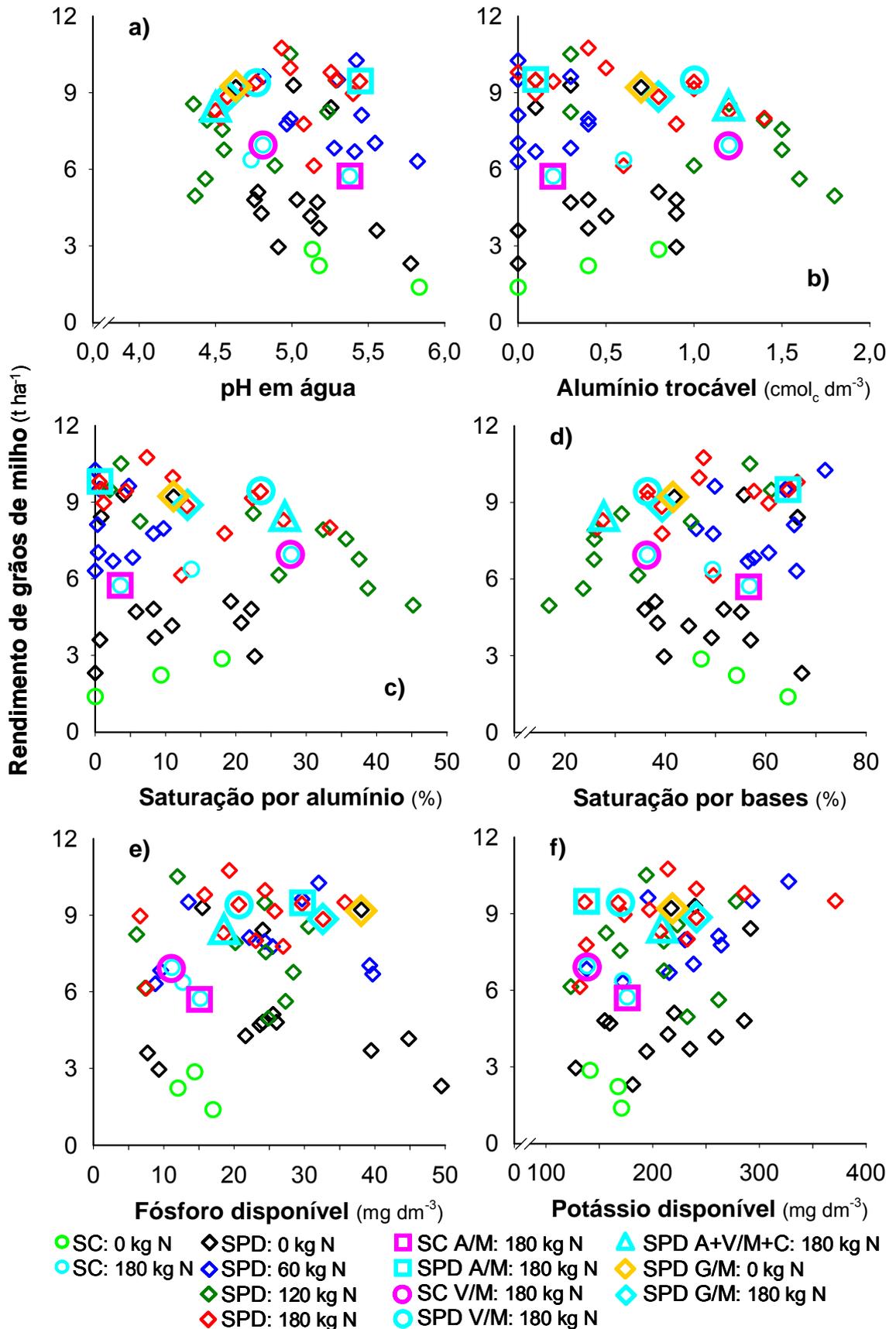


Figura 18. Relações entre os principais indicadores da fertilidade do solo e rendimento de grãos de milho avaliados em diferentes históricos de cultivo em experimentos, conduzidos mais de há 20 anos em Eldorado do Sul (PVd: 0-10 cm).

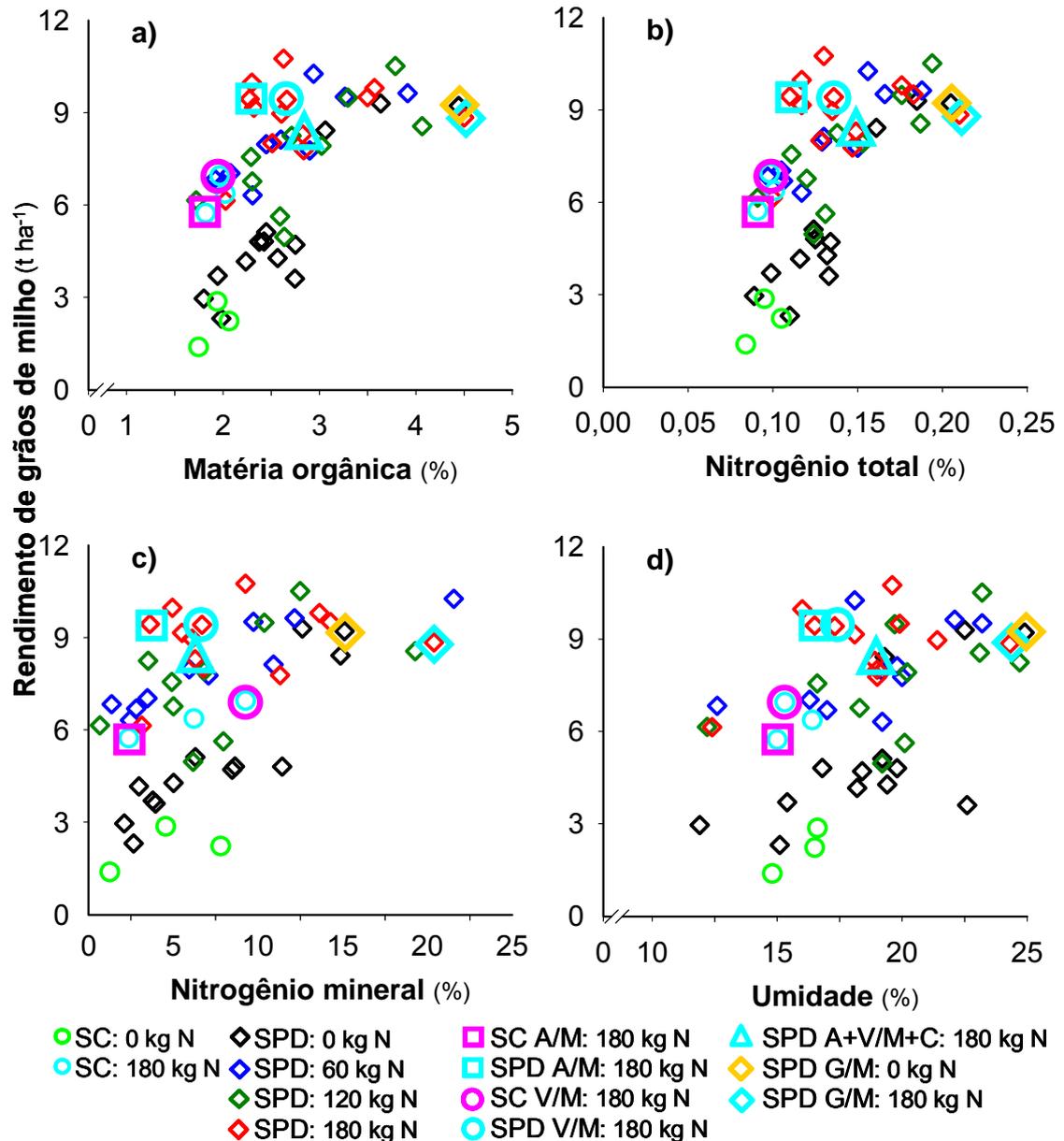


Figura 19. Relações entre outros indicadores da fertilidade do solo e o rendimento de grãos de milho avaliados em experimentos com diferentes históricos de cultivo, conduzidos há mais de 20 anos em Eldorado do Sul (PVd: 0-10 cm).

O “ruído” do processo de avaliação da fertilidade, percebido principalmente nos solos cultivados no SPD, há pelo menos mais de 10 anos, remete a seguinte questão: até que ponto um conjunto de valores ou faixas de interpretação de indicadores químicos pode representar, com confiabilidade, a fertilidade de um solo e garantir a expressão do potencial produtivo de uma cultura num determinado ambiente? Talvez seja necessária uma interpretação diferente dos resultados dos indicadores, sem considerá-los de modo isolado, mas em relação ao histórico de cultivo do solo. Assim, o “ruído” na avaliação da

fertilidade poderia ser diminuído, sem haver necessidade de mudança nas outras etapas do processo, entre elas a amostragem, as determinações químicas e a calibração; e menos ainda necessidade de mudar o conceito tradicional, amplamente utilizado no mundo há mais de 150 anos.

3.2.3 Tentativas para diminuir o “ruído” na avaliação da fertilidade: interpretar seus indicadores de outros modos

As tentativas para melhorar a avaliação da fertilidade, sem alterar significativamente o processo de avaliação, são muito importantes, principalmente se isso for possível em curto prazo e com poucos recursos financeiros. Talvez isso possa ser feito na etapa da interpretação dos resultados das análises químicas ou pelo acompanhamento da evolução dos indicadores tradicionais da fertilidade nos solos e da produtividade das culturas ou, ainda, pela seleção dos indicadores mais sensíveis, entre os tradicionais, para expressar a mudança do sistema de cultivo e da rotação no rendimento das culturas. Poder-se-ia, também, relacionar os teores ou os valores normalizados desses indicadores com a produtividade, para identificar grupos de pontos que pudessem caracterizar diferentes níveis de fertilidade do solo.

3.2.3.1 Evolução da relação entre os indicadores de fertilidade do solo e a produtividade das culturas

A demanda da planta por determinadas condições químicas do solo é função da espécie cultivada ou, em alguns casos, da própria variedade. Logo, um solo não é igualmente fértil para todas as culturas. Essa constatação é muito importante no acompanhamento da evolução da produtividade, pois a espécie do cultivo anterior pode ter demanda, em termos de fertilidade, diferente daquela a ser cultivada. Não se trata da quantidade necessária para o atendimento das necessidades da cultura, mas do nível de fertilidade para a planta se desenvolver. Isso pode ser observado para certos grupos de culturas no Manual de Adubação e de Calagem (CQFS RS/SC, 2004). Ao recomendar a correção do solo para P e K, as doses indicadas, quando o teor está nas faixas “Muito baixo”, “Baixo” ou “Médio”, não necessariamente são para atingir o teor crítico recomendado para a maioria das culturas de grãos. Para o grupo das hortaliças, por exemplo, o teor no solo, após a aplicação dos fertilizantes, será

muito maior do que para o grupo das essências florestais. Na verdade, esse é mais um “ruído” existente na avaliação da fertilidade, em que a calibração deveria ter sido feita para cada cultura ou grupo específico de culturas.

As gramíneas têm uma demanda por adubação nitrogenada muito maior que as leguminosas. Talvez este seja o motivo do comportamento verificado na evolução dos indicadores de fertilidade mais tradicionais (Tabela 4) e no rendimento de grãos de milho (Figura 20) no período de 1985 a 2005 em solo com diferentes históricos de cultivo, em Eldorado do Sul (Apêndice 2). Neste, o rendimento não foi relacionado aos valores dos indicadores químicos avaliados, pH, P e K disponíveis e MO e nem as suas alterações no tempo (Tabela 4). Os fatores determinantes da produtividade foram, em primeiro lugar, a adubação nitrogenada, em segundo a rotação e em terceiro o sistema de cultivo (Figura 20). Provavelmente, por ser conduzido sob irrigação, a diferença no rendimento devido aos sistemas de cultivo foi menor. Na média, os maiores rendimentos foram obtidos com N, rotação A+V/M+C e cultivo do solo no SPD. A combinação SPD A+V/M+C, com 180 kg ha⁻¹ de N, produziu 7,6 t de milho nos 20 anos e 9,1 t ha⁻¹ nos últimos 10 anos.

Tabela 4. Evolução dos principais indicadores de fertilidade do solo avaliados em experimentos com diferentes históricos de cultivo em Eldorado do Sul entre 1985 e 2005 (PVd: 0-10 cm)

Ano	Histórico de cultivo	Quantidade N kg ha ⁻¹	P disponível mg dm ⁻³	K disponível mg dm ⁻³	pH	MO %
1985 ¹	Início do experimento	0	9	79	5,3	2,2
1998 ²	SC A/M	0	32	202	5,6	1,8
2005	SC A/M	0	17	171	5,8	1,8
1998	SC A/M	180	29	172	5,2	2,1
2005	SC A/M	180	15	176	5,4	1,8
1998	SC A+V/M+C	0	30	262	5,2	2,1
2005	SC A+V/M+C	0	12	168	5,2	2,1
1998	SC A+V/M+C	180	27	153	5,2	2,3
2005	SC A+V/M+C	180	13	172	5,1	2,0
1998	SPD A/M	0	66	174	5,6	2,2
2005	SPD A/M	0	49	181	5,8	2,0
1998	SPD A/M	180	40	177	5,6	2,5
2005	SPD A/M	180	30	136	5,4	2,2
1998	SPD A+V/M+C	0	65	199	5,6	2,7
2005	SPD A+V/M+C	0	24	160	5,2	2,7
1998	SPD A+V/M+C	180	52	167	5,4	3,0
2005	SPD A+V/M+C	180	27	138	4,7	2,8

¹Adaptado de Freitas (1988); ²Carballo (2004).

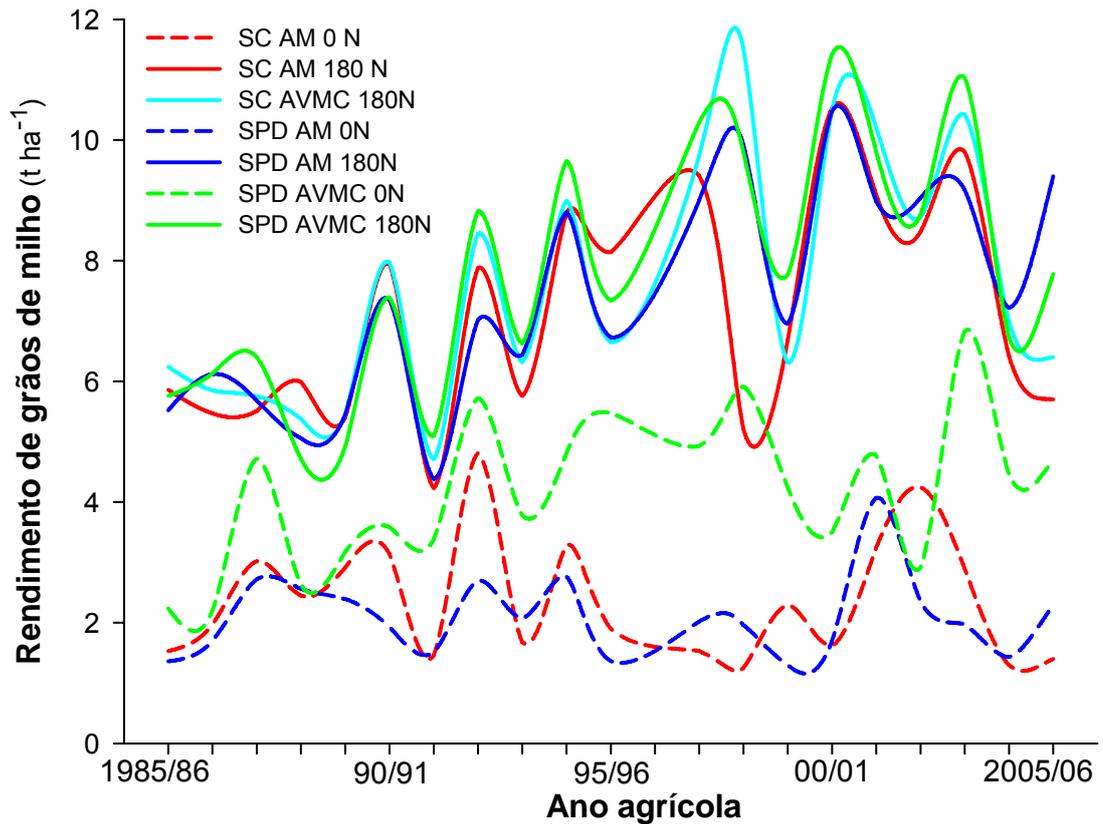


Figura 20. Evolução do rendimento de grãos de milho cultivado em solo com diferentes históricos de cultivo em Eldorado do Sul entre 1985 e 2005 [resultados de 1985 a 2003: Zanatta (2006)].

Resultados semelhantes aos de Eldorado do Sul foram também obtidos em experimentos, sem irrigação, em Santo Ângelo (Apêndice 4) e em Passo Fundo (Apêndice 5), com a cultura da soja. Em Santo Ângelo verifica-se que com o tempo de cultivo o rendimento de grãos foi maior no SPD (Figuras 21b e 21c) do que no SC (Figura 21a). A tendência da evolução do rendimento da soja não segue a de nenhum dos indicadores tradicionais de fertilidade (Figura 21). Os resultados mostram também que a evolução do teor de MO nos sistemas de cultivo foi muito semelhante. Nas avaliações feitas em Passo Fundo, com a mesma rotação de culturas em diferentes sistemas de cultivo, também se verifica a ausência de uma relação direta entre a evolução dos indicadores de fertilidade no solo e o rendimento (Figura 22). Em relação à evolução dos indicadores os resultados mostram uma tendência de aumento dos teores de P disponível e de MO com o tempo de cultivo no SPD (Figura 22c). Neste, o rendimento foi influenciado sobretudo pela precipitação pluviométrica ocorrida na região de Passo Fundo no período avaliado (Figura 23). Provavelmente, essa foi a causa do baixo rendimento em alguns anos, pois os indicadores da fertilidade estavam em níveis adequados (Figuras 22 e 23).

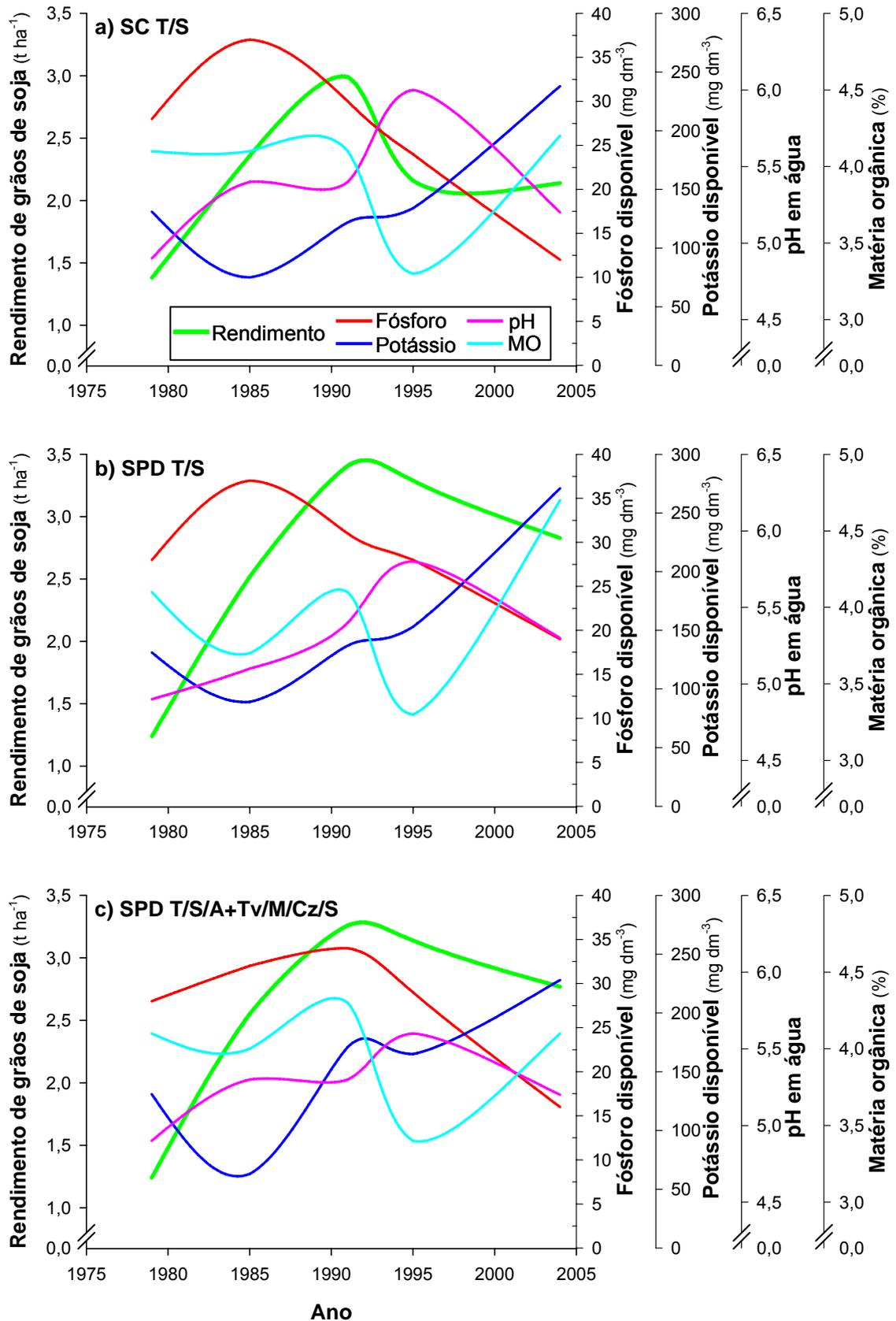


Figura 21. Evolução dos principais indicadores da fertilidade de solo e do rendimento de grãos de soja cultivada no SC T/S (a), no SPD T/S (b) e no SPD T/S/A+Tv/M/Cz/S (c) em Santo Ângelo entre 1979 e 2004 (LVdf: 0-10 cm).

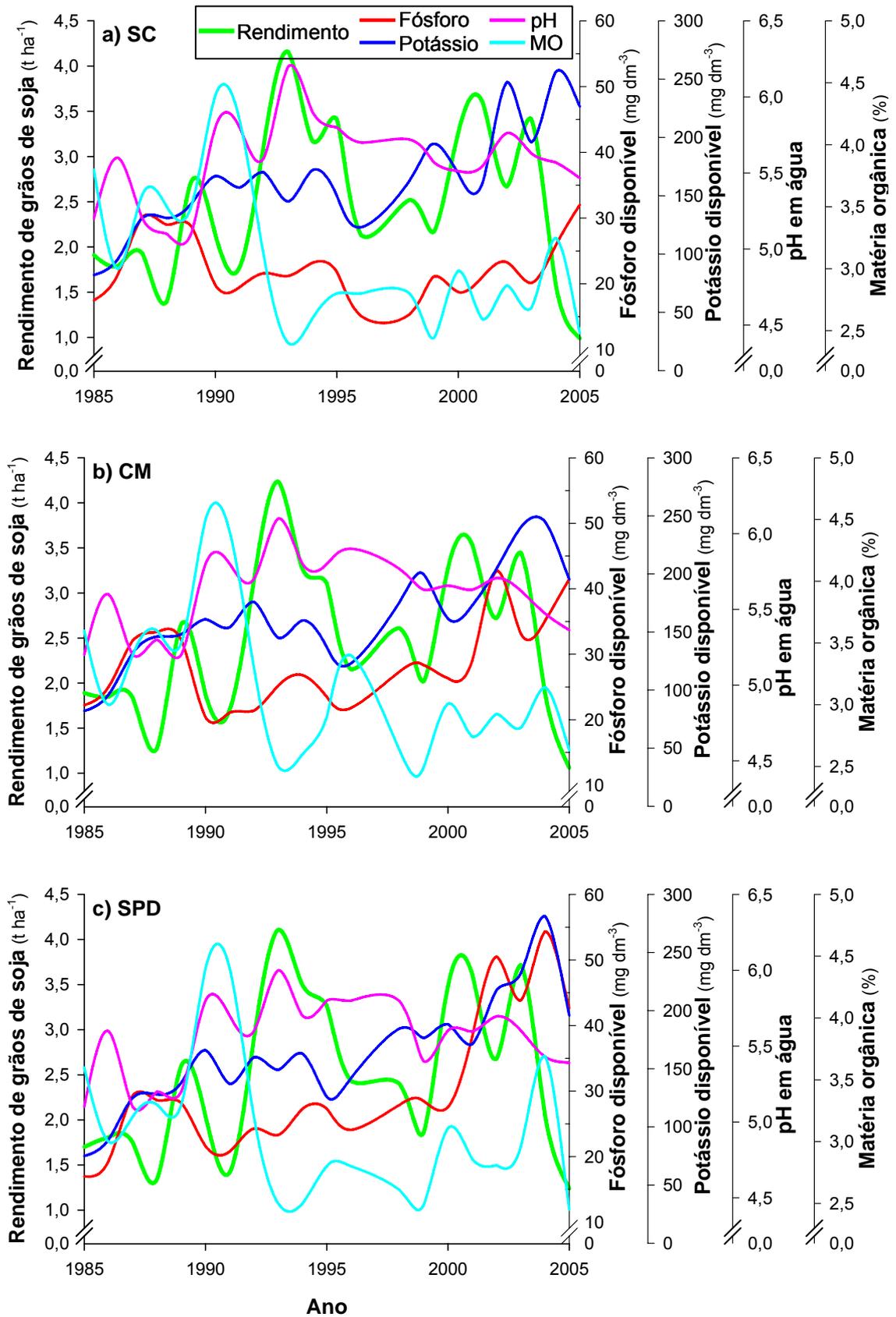


Figura 22. Evolução dos principais indicadores da fertilidade e do rendimento de grãos de soja cultivada no SC (a), no CM (b) e no SPD (c), com a rotação S/Cv/S/V/Sg/Ab, em Passo Fundo entre 1985 e 2005 (LVd: 0-20 cm).

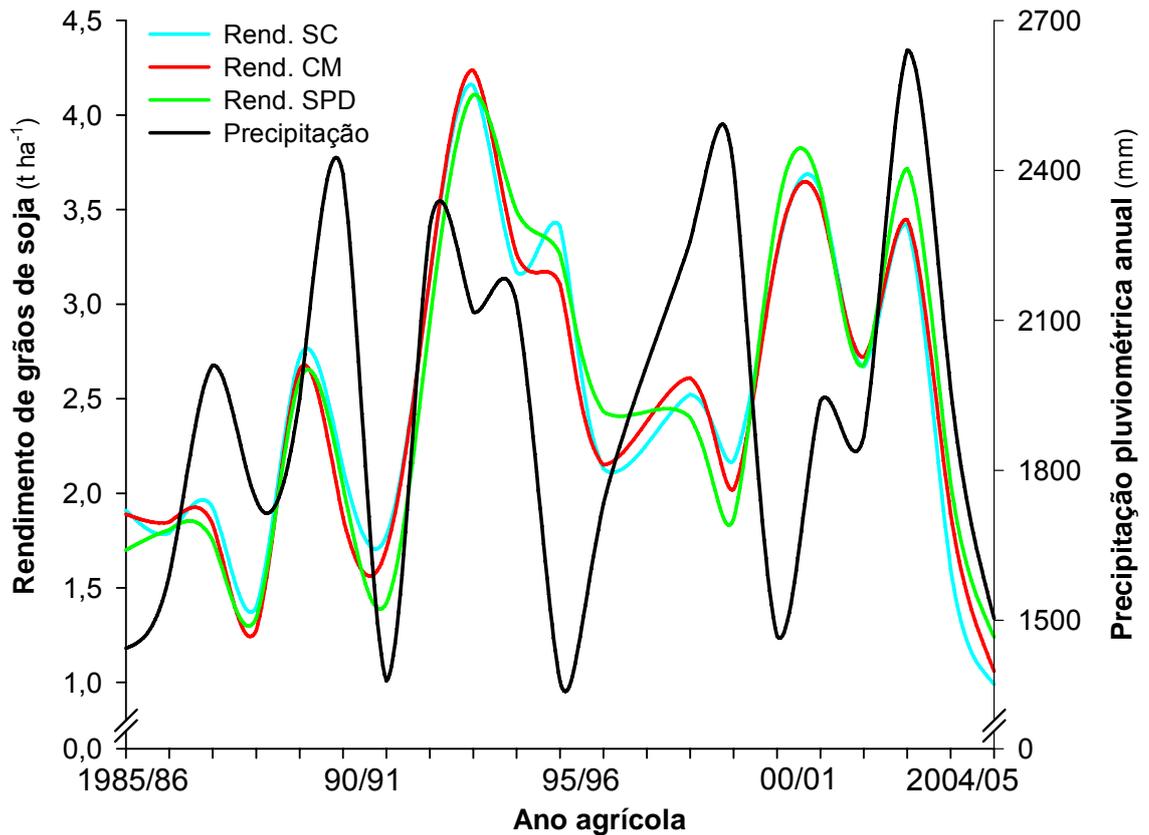


Figura 23. Evolução do rendimento de grãos de soja em diferentes sistemas de cultivo e da precipitação pluviométrica anual em Passo Fundo entre 1985 e 2005 (Denardin & Kochhann, 2006 — comunicação pessoal).

O acompanhamento da evolução dos indicadores de fertilidade no solo e do rendimento das culturas não parece ser um recurso eficiente para melhorar a interpretação dos resultados das análises químicas e, conseqüentemente, a avaliação da fertilidade (Tabela 4, Figuras 20, 21 e 22). Ou seja, não é viável a utilização deste recurso como ferramenta única para avaliar e definir as quantidades de adubos e corretivos que devem ser adicionadas ao solo. De fato, não houve uma evidência clara de que a evolução do rendimento de uma cultura fosse majoritariamente explicada pelos indicadores químicos da fertilidade. Evidentemente que para os casos em que o valor deles está acima do teor mínimo, essa relação não é esperada. Essa informação é muito importante, pois sugere que no SPD existem outros parâmetros de avaliação que se relacionam melhor com o rendimento do que os tradicionalmente avaliados. O clima no RS é temperado úmido e, mesmo assim, freqüentemente o rendimento é limitado pela precipitação pluviométrica. Esse dano pode ser minimizado com práticas que aumentam a capacidade do solo em armazenar e disponibilizar água, ou seja, que melhorem as suas condições físicas.

3.2.3.2 Sensibilidade dos indicadores de fertilidade para expressar a mudança do sistema de cultivo

Um indicador de fertilidade é sensível para expressar as alterações promovidas pela mudança do sistema de cultivo e/ou da rotação de culturas na fertilidade do solo percebida pelas plantas, quando sua variação é proporcional à variação no rendimento das culturas. Para os indicadores tradicionais de fertilidade, essa sensibilidade foi avaliada pelo rendimento de grãos de milho em experimentos que estão sendo conduzidos há mais de 20 anos em Eldorado do Sul (Apêndice 2). As alterações nesses atributos e no rendimento foram avaliadas comparativamente ao tratamento SC A/M, considerado como referência (= 100%); os valores dos indicadores do solo e do rendimento dos outros tratamentos foram transformados em porcentagem em relação à referência (Apêndice 6). Assim, é possível observar o comportamento de vários indicadores em relação ao rendimento em uma mesma figura.

As alterações nos indicadores químicos do solo inicialmente utilizados para avaliar a fertilidade no RS — pH em água, P e K disponíveis e MO — foram comparados ao rendimento de grãos (Figura 24). Verifica-se que os indicadores MO e P disponível foram os que melhor expressaram as mudanças no sistema de cultivo tanto sem (Figura 24a) como com adubação nitrogenada (Figura 24b). A MO é fonte importante desse nutriente às culturas e está associada a outros fatores físicos que promovem o crescimento das plantas, como agregação e umidade volumétrica do solo. Contudo, esse procedimento de cálculo não tem sensibilidade para diferenciar valores de pH, pois estes podem variar no máximo 50% (variaram menos neste exemplo), enquanto outros indicadores podem variar mais de 200%. Quando os pontos são colocados no mesmo gráfico os valores de pH tendem a se agrupar. O comportamento dos outros indicadores, que foram agregados ao sistema de avaliação da fertilidade no RS/SC — Al, Ca e Mg trocáveis e depois CTC, V e m — a partir da década de 1980, pode ser observado na Figura 25. Desses indicadores, a CTC efetiva e o teor de Mg trocável no solo foram os que melhor expressaram a mudança do sistema de cultivo. Enquanto os indicadores considerados mais importantes no SC, entre eles o teor de Al trocável (ou m) e a V, foram os que menos se relacionaram com o rendimento de grãos do milho (Figura 25).

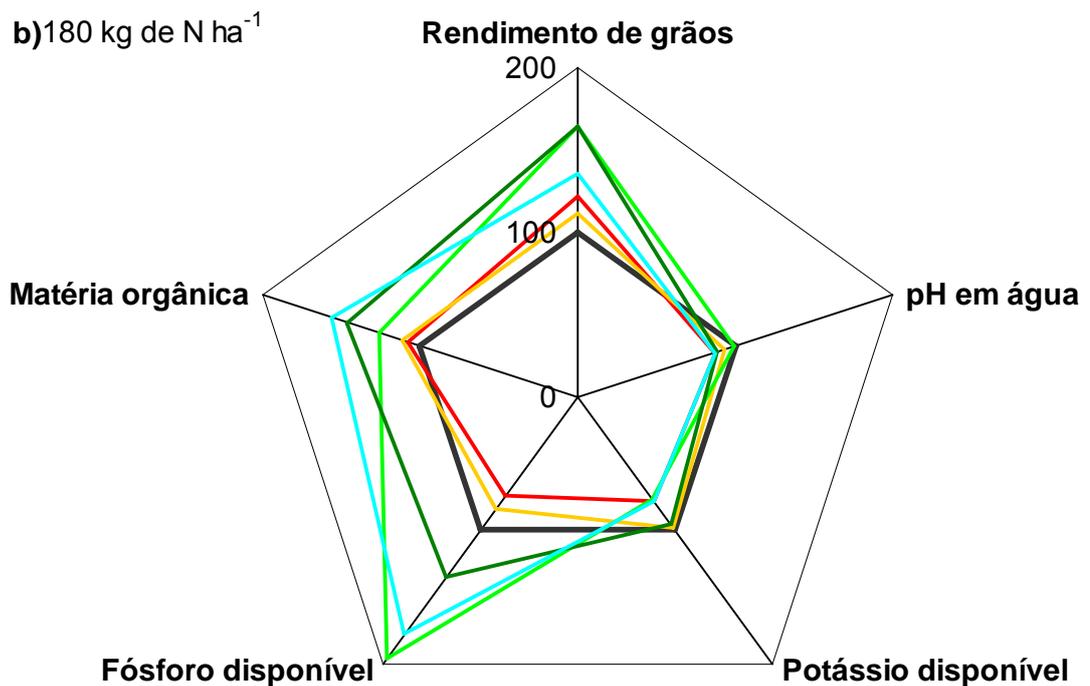
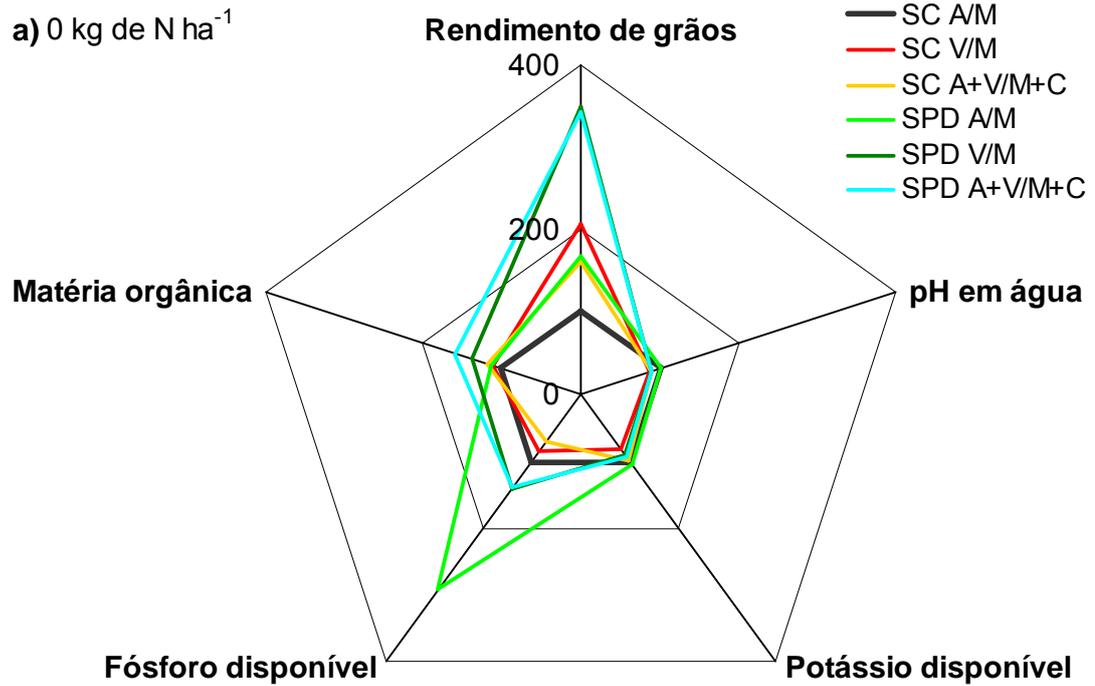


Figura 24. Representação integrada (%) do rendimento de grãos de milho com os primeiros indicadores da fertilidade de solo utilizados no RS — pH em água, fósforo e potássio disponíveis e matéria orgânica — avaliados em experimentos com diferentes históricos de cultivo [(a) 0 e (b) 180 kg ha⁻¹ de N], conduzidos há mais de 20 anos em Eldorado do Sul (PVd: 0-10 cm; referência: 100% = SC A/M).

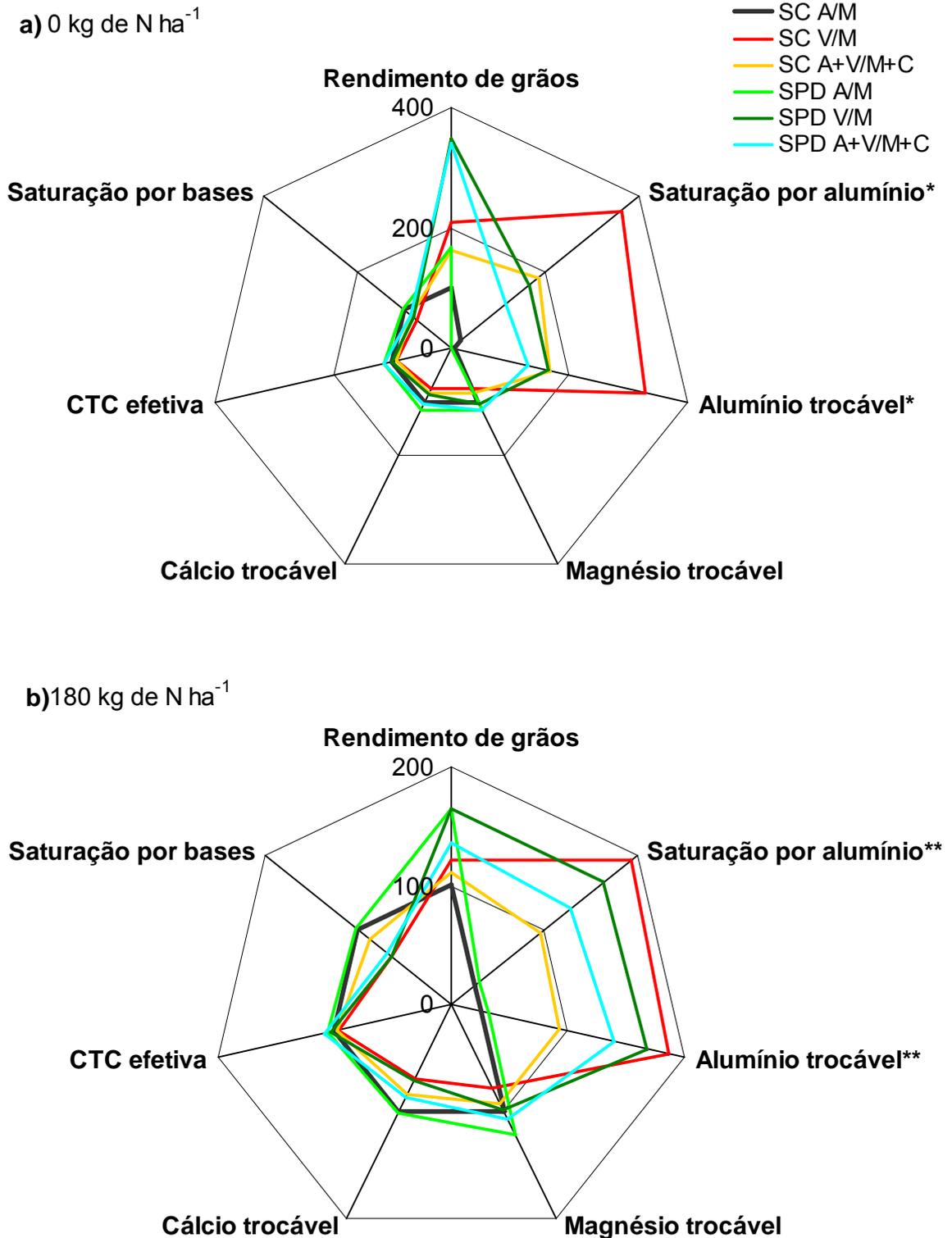


Figura 25. Representação integrada (%) do rendimento de grãos de milho com os indicadores da fertilidade do solo agregados aos primeiros utilizados no RS — alumínio, cálcio e magnésio trocáveis, saturação por bases e por alumínio e CTC efetiva — em experimentos com diferentes históricos de cultivo [(a) 0 e (b) 180 kg ha⁻¹ de N], conduzidos há mais de 20 anos em Eldorado do Sul (PVd: 0-10 cm; referência: 100% = SC A/M; *m/5 e Al/25; **m/4 e Al/4).

Os indicadores mais sensíveis à mudança no sistema de cultivo (Figura 26) foram selecionados com base nas Figuras 24 e 25. Desses, a MO é um indicador melhor nos tratamentos que receberam adubação nitrogenada (Figura 26b) em comparação àqueles que não receberam (Figura 26a). Constata-se o mesmo para os indicadores N total e umidade, que são relacionados ao teor de MO do solo. No entanto, tais relações entre esses fatores e o rendimento não expressaram os efeitos dos sistemas de cultivo e nem das rotações que se refletem no rendimento das culturas (Figura 26). O fato de o experimento ter sido conduzido sob irrigação não evitou a influência da umidade do solo na absorção de nutrientes pelas plantas. Por exemplo, o N total e a umidade para alguns tratamentos são indicadores tão sensíveis quanto os outros quatro tradicionalmente avaliados, como P disponível, Mg trocável, CTC efetiva e MO (Figura 26), quando esses indicadores são avaliados separadamente em relação a tratamentos com diferentes quantidades de adubação nitrogenada. Entretanto nenhum deles possui um alto grau de associação com o rendimento de grãos de milho produzido nos diferentes sistemas de cultivo, rotações de culturas e adubação nitrogenada (Figura 26), muito menos quando são comparadas juntas as diferentes adubações nitrogenadas em relação ao SC A/M sem N (Figura 27). Contudo, o efeito observado neste trabalho pode não se repetir em outro local e com outra cultura.

A utilização ou melhoria do uso desses indicadores na avaliação da fertilidade requer nova calibração para os diferentes sistemas de cultivo e para cada (ou grupo de) cultura no RS, a fim de definir os teores críticos e as faixas de interpretação considerando o histórico de cultivo do solo (efeito do tempo e da diversidade de culturas). Esse ajuste no processo de avaliação demanda muito recurso financeiro, tempo e trabalho de campo. É muito difícil de ser desenvolvido, à semelhança do desenvolvimento de nova metodologia de manuseio de amostras indeformadas de solo. No entanto, pela observação dos resultados dos indicadores no solo e do rendimento, talvez possa ser possível perceber o que tem no solo (indicador e proporção) quando as plantas produzem mais, e ajustar, assim, esse(s) fator(es) para o rendimento pretendido.

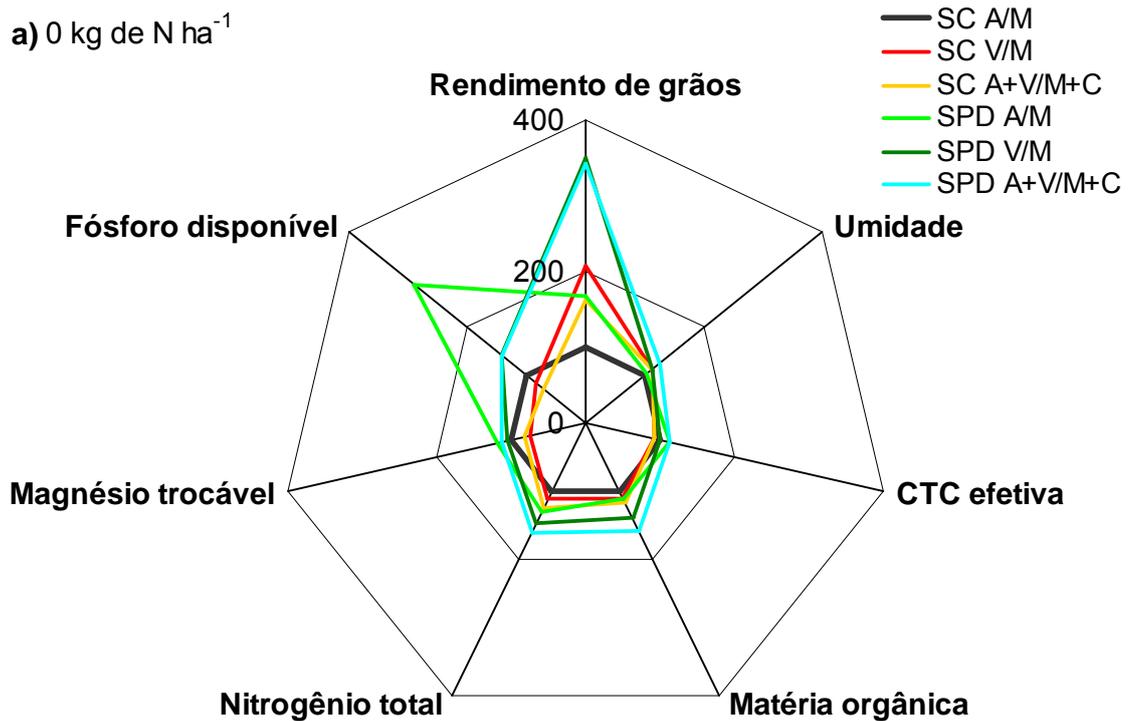
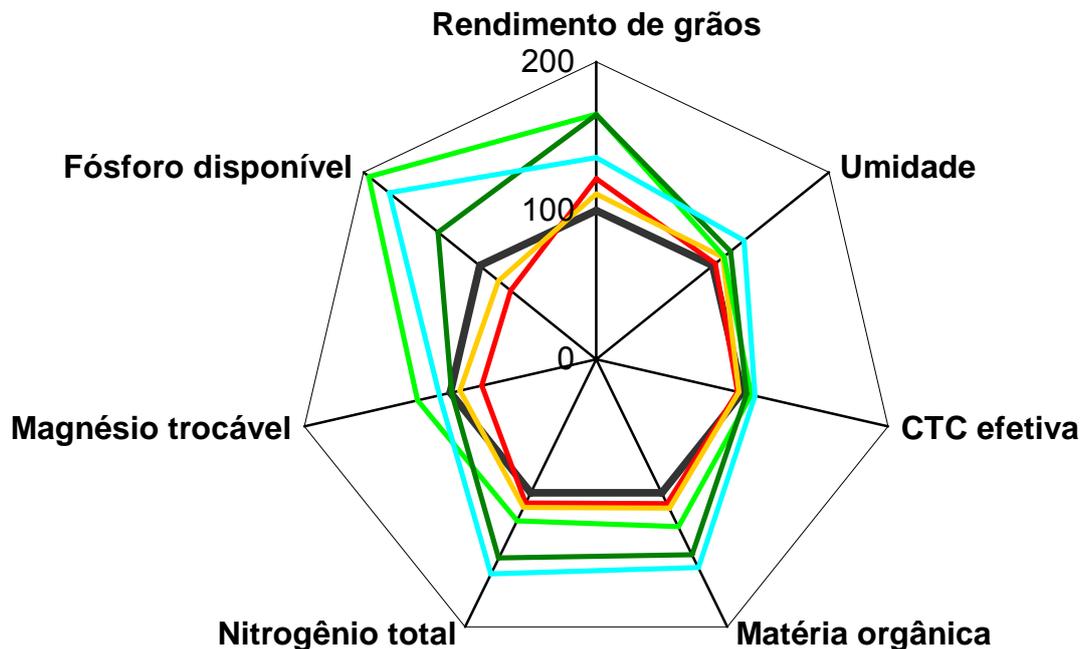
a) 0 kg de N ha⁻¹b) 180 kg de N ha⁻¹

Figura 26. Representação integrada (%) do rendimento de grãos de milho com os indicadores da fertilidade do solo mais sensíveis — fósforo disponível, magnésio trocável, nitrogênio total, matéria orgânica, CTC efetiva e umidade — em expressar a mudança no sistema de cultivo em experimentos conduzidos há mais de 20 anos em Eldorado do Sul [(a) 0 e (b) 180 kg ha⁻¹ de N; PVd: 0-10 cm; referência: 100% = SC A/M].

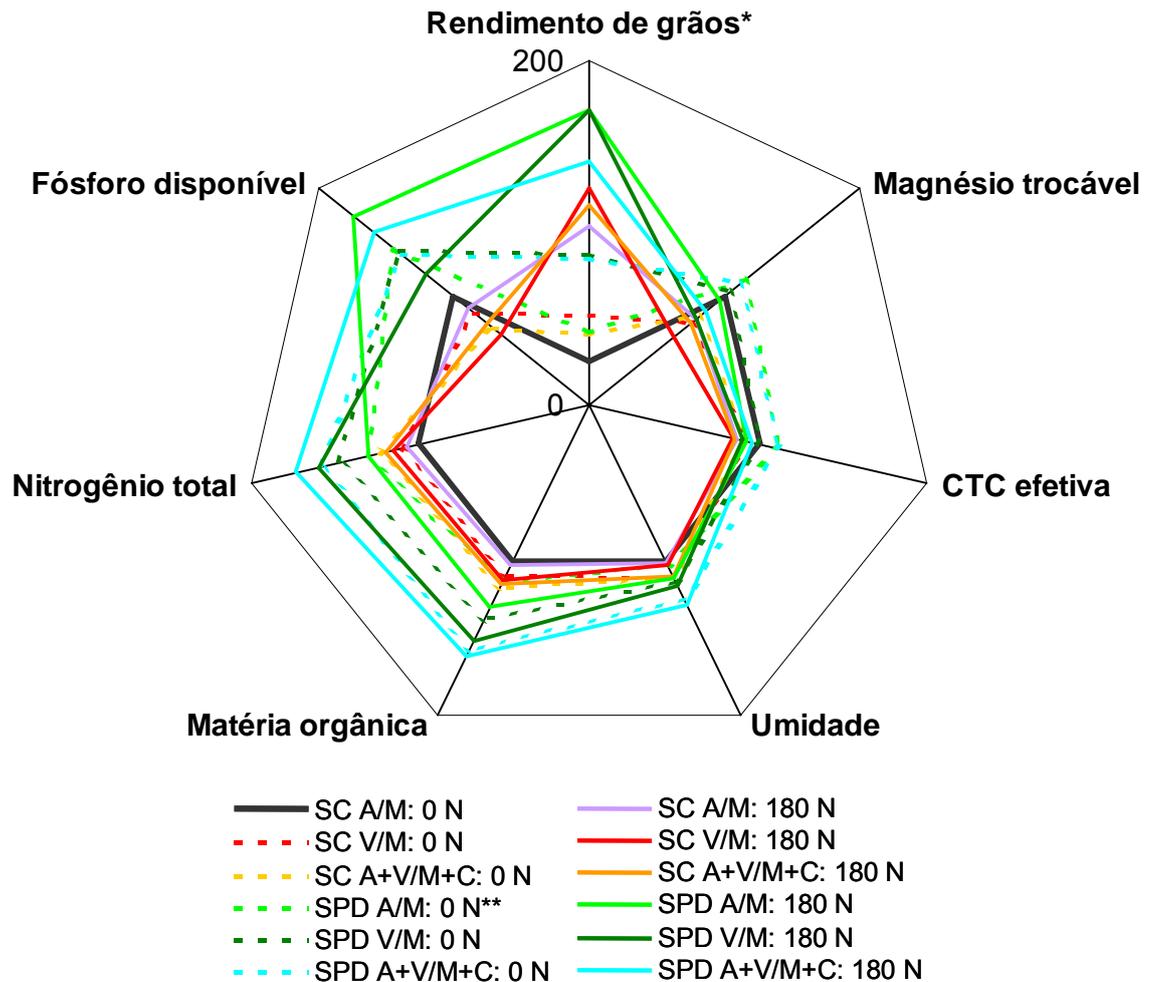


Figura 27. Representação integrada (%) dos indicadores da fertilidade do solo — fósforo disponível, magnésio trocável, nitrogênio total, matéria orgânica, CTC efetiva e umidade — para expressar o rendimento de grãos de milho em experimentos conduzidos há mais de 20 anos em Eldorado do Sul (PVd: 0-10 cm; referência: 100% = SC A/M sem N; *rend./4; **P/2).

3.2.3.3 Aplicação da técnica da normalização aos resultados de indicadores para identificar níveis de fertilidade nos solos

A relação entre indicadores normalizados permite visualizar agrupamentos ou famílias de pontos de um indicador principal (rendimento das culturas) em relação aos indicadores de fertilidade que determinam a mudança no seu comportamento. Devido esta técnica de normalização de dados não ser comumente utilizada para interpretar resultados em Ciência do Solo, foram testados dois modos de sua aplicação para verificar se ela detecta as diferenças de níveis de fertilidade dos solos percebidas pelas plantas. Para testá-la foram considerados somente os resultados dos indicadores químicos da fertilidade do solo, independente do sistema de cultivo, da rotação de

culturas ou do tipo de adubação. A técnica foi testada com os resultados das avaliações feitas durante o período de condução dos experimentos em Eldorado do Sul, em Passo Fundo e em Santo Ângelo (Apêndice 7). No Teste 1, todos os valores dos indicadores de fertilidade e de rendimento das culturas foram normalizados (Tabela 5), sendo que ao valor mínimo e máximo reais de cada indicador, em cada local, foram atribuídos valores zero e 100, respectivamente. No Teste 2, os indicadores do solo foram normalizados considerando a amplitude dos indicadores normalmente encontrada nos solos; os valores mínimos como zero e os valores máximos como 100 (Tabela 6) e foi utilizado o rendimento relativo ao invés de absoluto, calculado considerando o mínimo possível como zero (neste caso não real) e o máximo obtido em cada local como 100%. Para alguns indicadores, o valor máximo corresponde ao limite superior da faixa “Alto” de acordo com o Manual de Adubação e de Calagem (CQFS RS/SC, 2004). Nos testes, os valores de Al trocável e de m normalizados foram invertidos, isto é, diminuídos de 100 (por exemplo: valor normalizado de 38 corresponde ao valor invertido de 62).

Nas figuras elaboradas utilizando a técnica da normalização dos resultados separadamente para cada local avaliado (Figura 28), não foi possível diferenciar “famílias” de pontos que expressassem a resposta das plantas a determinados níveis de fertilidade dos solos. O esperado era que, pelo menos, três famílias de pontos fossem identificadas: uma de baixo rendimento, indicando fertilidade do solo baixa (na Figura 28a, circulada em preto); outra de valores intermediários (na Figura 28a, circulada em azul) e, outra de alto rendimento, indicando fertilidade do solo alta (na Figura 28a, circulada em verde). Entretanto, famílias de pontos assim distribuídas não foram identificadas (Figura 28). As famílias identificadas indicam que esta técnica dificilmente expressará diferentes níveis de fertilidade do solo (Figura 28b) ou poderá ser utilizada para melhorar a interpretação dos resultados dos indicadores na sua avaliação. Pelas famílias identificadas nas avaliações feitas em Passo Fundo (na Figura 28b, circuladas em vermelho e rosa), verifica-se que independentemente dos indicadores de fertilidade e dos seus valores (de zero a 60) tanto pode ser obtido de 20 a 40% como de 60 a 80% do rendimento de grãos. Por essa avaliação, se verifica que a técnica de normalização não expressa a relação existente entre fertilidade e a produtividade das plantas.

Tabela 5. Valores mínimos e máximos reais dos indicadores de fertilidade utilizados na normalização dos dados avaliados em Eldorado do Sul, Passo Fundo e Santo Ângelo (Apêndice 7)

Valores equivalentes para a normalização ¹	Valores reais dos indicadores de fertilidade							
	Rendimento de grãos ²	pH	P	K	Al	MO	V	m
	t ha ⁻¹		--mg dm ⁻³ --		cmol _c dm ⁻³		-----%-----	
Eldorado do Sul								
Valor mínimo = 0	0,9	4,3	7,7	45	0,0	1,7	27	0,0
Valor máximo = 100	11,5	5,8	75,0	262	2,0	4,5	67	35
Passo Fundo								
Valor mínimo = 0	1,0	5,1	15,1	75	0,0	2,4	48	0,9
Valor máximo = 100	4,2	6,2	54,3	281	0,9	4,5	74	7,5
Santo Ângelo								
Valor mínimo = 0	1,2	4,9	12,0	47	0,0	3,3	56	0,0
Valor máximo = 100	3,4	6,0	45,0	311	0,7	4,7	85	9,5

¹ Fórmula para normalização dos resultados: X (valor normalizado entre zero e 100) = [(valor real no ponto – valor real mínimo) x 100] / (valor real máximo – valor real mínimo); ²avaliado na cultura do milho em Eldorado do Sul e da soja em Passo Fundo e em Santo Ângelo.

Tabela 6. Valores mínimos e máximos normalmente encontrados dos indicadores de fertilidade utilizados na normalização dos dados de solo avaliados em Eldorado do Sul, Passo Fundo e Santo Ângelo e bases de cálculo do rendimento relativo de grãos em cada local

Valores equivalentes para a normalização	Valores reais dos indicadores de fertilidade							
	Rendimento de grãos	pH	P	K	Al	MO	V	m
	t ha ⁻¹		--mg dm ⁻³ --		cmol _c dm ⁻³		-----%-----	
Eldorado do Sul								
Valor mínimo = 0	0	4,5	0	30	0,0	1,5	20	0
Valor máximo = 100	11,5	6,0	24	180	1,5	4,5	75	35
Passo Fundo								
Valor mínimo = 0	0	4,5	0	30	0,0	1,5	20	0
Valor máximo = 100	4,2	6,0	18	180	1,5	4,5	75	35
Santo Ângelo								
Valor mínimo = 0	0	4,5	0	30	0,0	1,5	20	0
Valor máximo = 100	3,4	6,0	12	180	1,5	4,5	75	35

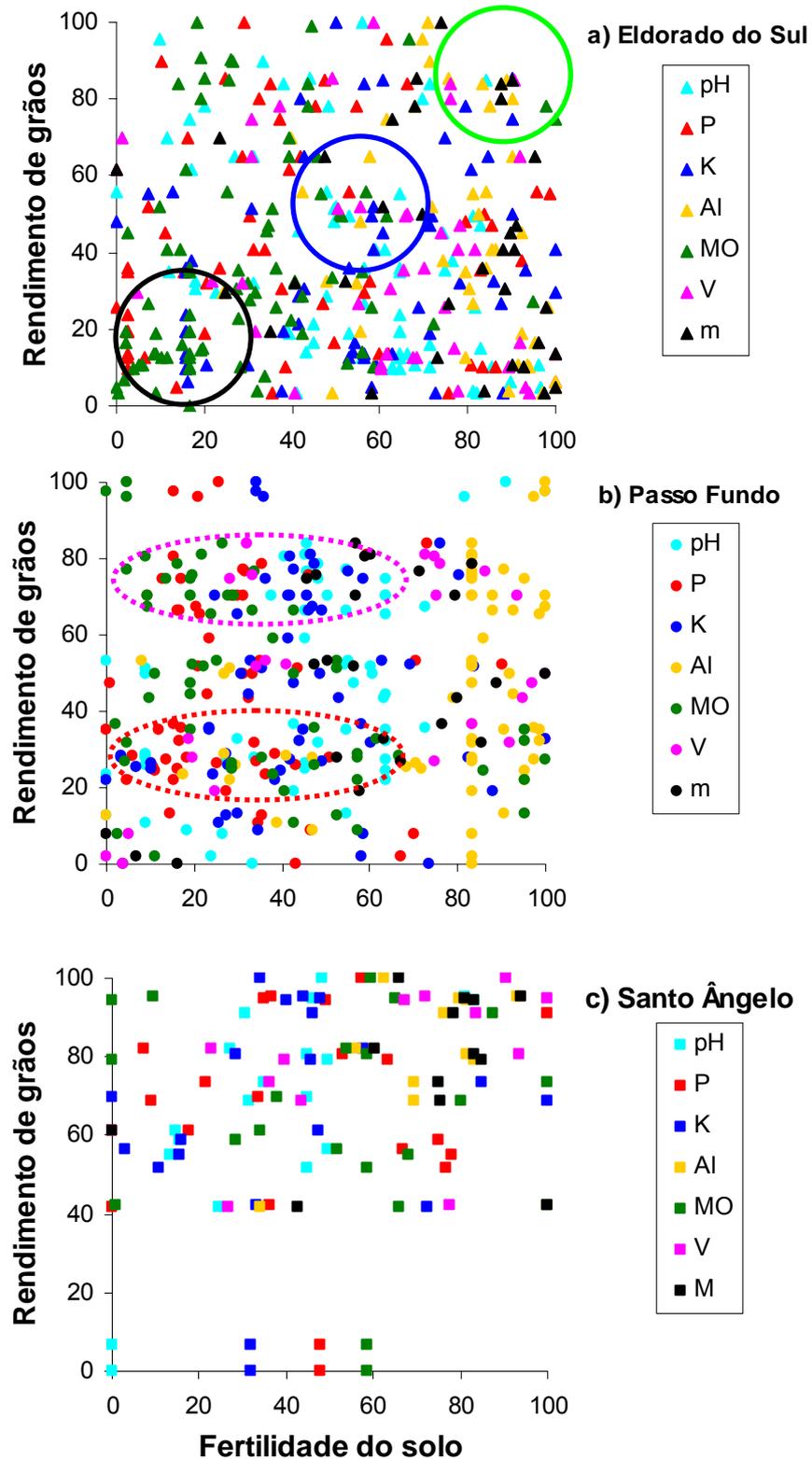


Figura 28. Relações entre indicadores da fertilidade do solo — pH em água, fósforo e potássio disponíveis, alumínio trocável, matéria orgânica, saturação por bases e por alumínio — e o rendimento de grãos das culturas normalizados conforme as condições avaliadas em cada local, Eldorado do Sul (a), Passo Fundo (b) e Santo Ângelo (c) [Al e m invertidos; (a) e (c): 0-10 cm; (b): 0-20 cm].

A expressão de níveis de fertilidade pela normalização dos dados não melhorou com a utilização da amplitude geralmente verificada no campo dos indicadores de solo e do rendimento relativo de grãos (Teste 2, Tabela 6 e Figura 29). Neste teste, observa-se que os pontos, conseqüentemente as famílias, se deslocaram da esquerda para a direita. São identificadas duas famílias: uma nas avaliações feitas em Passo Fundo e outra em Santo Ângelo (nas Figuras 29b e 29c, circuladas em verde), isto é, grupos de pontos que poderiam indicar fertilidade alta, porém não correspondem, necessariamente, a rendimento alto das culturas (nas Figuras 29a e 29b, circulados em vermelho).

A diferenciação dos níveis de fertilidade pela normalização dos resultados deveria ser melhor expressa quando observadas as avaliações de cada local numa única figura do que separadas por local (Figura 30). As associações definidas entre fertilidade do solo e rendimento de grãos (conforme esperado, na Figura 28a, destacado com círculos) não são observadas utilizando os pressupostos do Teste 1 (Figura 30a). Entretanto, utilizando os pressupostos do Teste 2 (Figura 30b) (faixas dos indicadores normalmente verificadas nos solos e rendimento relativo de grãos), observa-se uma capacidade maior da técnica de expressar os níveis de fertilidade. No Teste 1 (Figura 30a), houve uma baixa associação entre a fertilidade avaliada de modo tradicional e o rendimento das culturas nos diferentes locais com diferentes históricos de cultivo. Pela Figura 30a (famílias circuladas em amarelo), constata-se rendimentos relativos de grãos de 40 ou de 80% com valores normalizados dos indicadores de fertilidade de 20 a 60%. Na Figura 30b, podem ser visualizadas duas famílias com comportamento esperado, isto é, o rendimento aumenta com o aumento da fertilidade (uma circulada em azul na posição média da figura e outra em verde, na posição alta). No entanto, identifica-se também uma família com fertilidade alta cujo rendimento pode ser aproximadamente 40% (circulada em vermelho) ou 80% (circulada em verde). Por isso, verifica-se que a técnica não delimita com precisão as famílias de pontos para poder utilizá-las na expressão de níveis de fertilidade do solo (Figuras 28, 29 e 30). Os testes feitos com os resultados normalizados dos indicadores tradicionais de fertilidade do solo e do rendimento de grãos das culturas indicam que esta técnica, no momento, não contribui para a melhoria da interpretação dos indicadores de fertilidade.

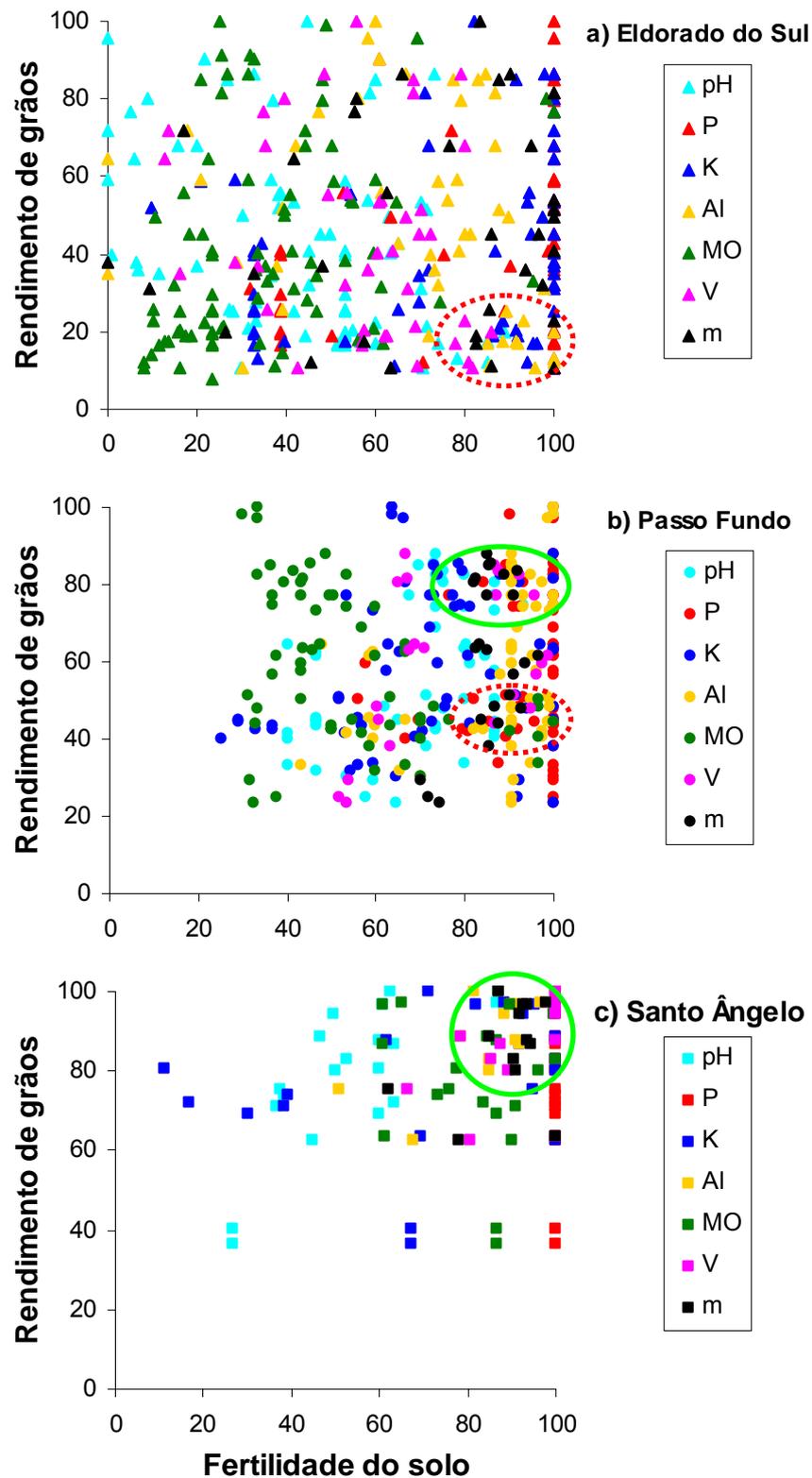


Figura 29. Relações entre indicadores da fertilidade do solo — pH em água, fósforo e potássio disponíveis, alumínio trocável, matéria orgânica, saturação por bases e por alumínio — normalizados e rendimento relativo de grãos calculado conforme as condições avaliadas em cada local, Eldorado do Sul (a), Passo Fundo (b) e Santo Ângelo (c) [Al e m invertidos; (a) e (c): 0-10 cm; (b): 0-20 cm].

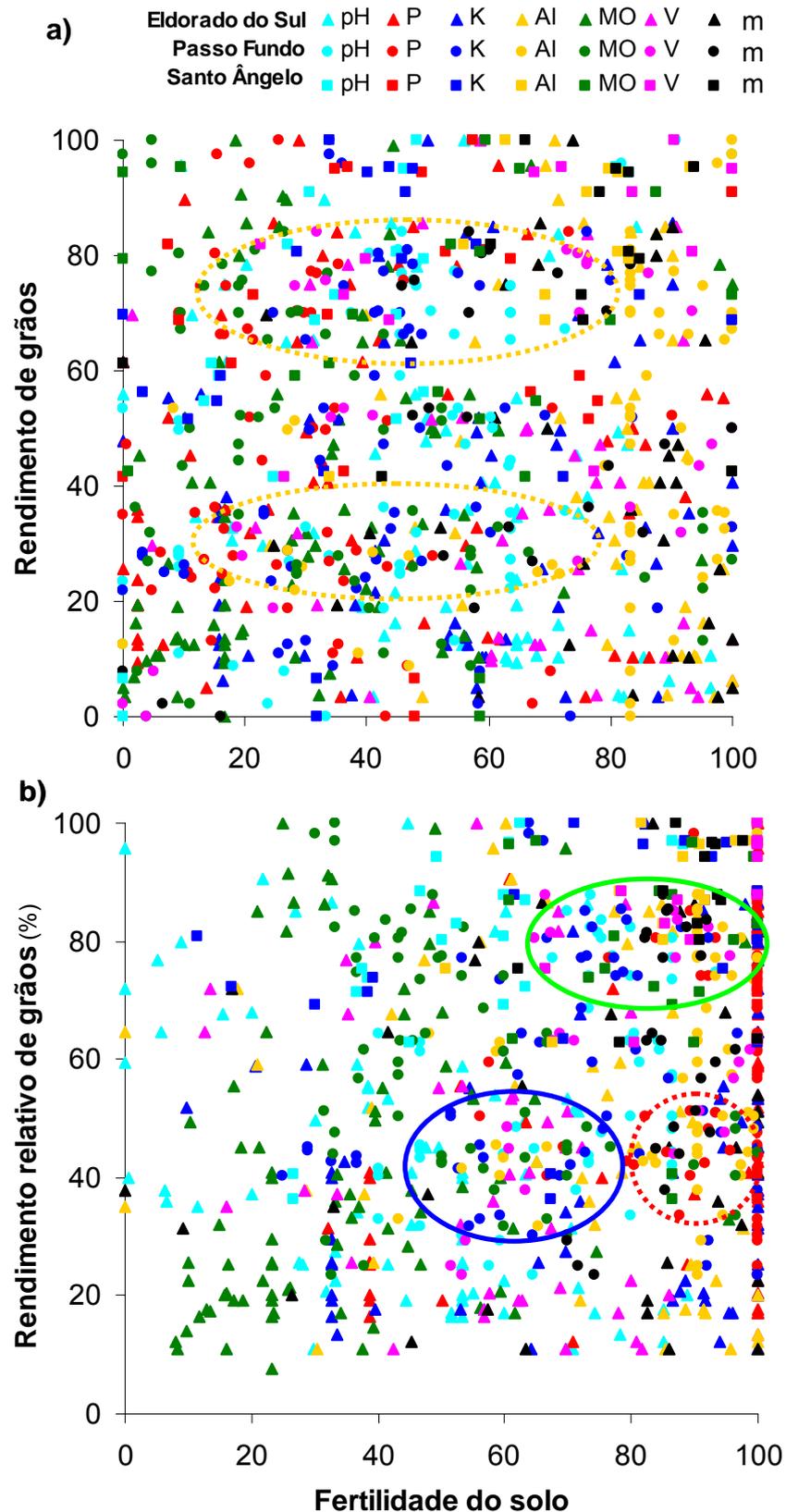


Figura 30. Relações entre indicadores da fertilidade do solo — pH em água, fósforo e potássio disponíveis, alumínio trocável, matéria orgânica, saturação por bases e por alumínio — e o rendimento de grãos normalizados [Teste 1: (a)] e com os indicadores normalizados com padrões semelhantes e rendimento relativo de grãos [Teste 2: (b)], em Eldorado do Sul, Passo Fundo e Santo Ângelo juntos [Al e m invertidos; (a) e (c): 0-10 cm; (b): 0-20 cm].

3.2.4. Insuficiência da avaliação e do conceito tradicional para expressar a fertilidade do solo percebida pelas plantas

A fertilidade dos solos melhorou nos últimos 40 anos no RS, especialmente na região produtora de grãos, também pelo uso de adubos e corretivos de acidez, tendo como base a avaliação química do solo. Os resultados de experimentos conduzidos em Eldorado do Sul, em Passo Fundo, em Santo Ângelo e das lavouras no Planalto Médio, mostram que o “ruído” no processo de avaliação da fertilidade do solo é muito alto e indicam que essa, principalmente no SPD, é insuficiente para expressar a fertilidade do solo percebida pelas plantas. Os indicadores químicos nem sempre detectam a mudança na fertilidade dos solos promovida pelos diferentes sistemas de cultivo e rotações de culturas e, em geral, apresentam um baixo grau de associação com o rendimento das plantas. A melhoria da fertilidade dos solos do RS nos últimos 40 anos, expressa pelo rendimento das culturas, é maior do que a quantificada pelas determinações químicas dos indicadores de fertilidade. A mudança do sistema de cultivo, do SC para o SPD, e os benefícios do tempo de cultivo nesse sistema, proporcionados ao solo e ao desenvolvimento das plantas, diminuem a importância do uso isolado de atributos químicos avaliados em amostras de solo.

Melhorar a aplicação do conhecimento significa diminuir o “ruído” nas diversas etapas da avaliação da fertilidade. Isso requer, necessariamente, uma reflexão profunda sobre o conceito da fertilidade do solo. Nesta reflexão, é importante lembrar que as atitudes do homem junto com a fertilidade real do solo determinam o sucesso do cultivo das plantas em determinado ambiente e que a percepção do homem sobre a fertilidade jamais será igual a tida pela planta. Entretanto, aproximar estas percepções é um dos caminhos para melhorar o entendimento e contribuir mais com a melhoria da fertilidade do solo para o bom desenvolvimento das plantas e para a preservação do ambiente.

O conceito da fertilidade de solo deveria ser reformulado e, a partir disso ser construído um novo sistema para a sua avaliação. Considerar o solo como um todo, um sistema aberto, que troca matéria e energia com outros sistemas, poderia ser uma alternativa. Para isso é necessário, por primeiro, entender o funcionamento do sistema solo e

identificar as principais interações entre ele e outros sistemas de interesse. Após conhecidas as principais interações, os elementos e as forças que dão vida aos processos que fazem com que o sistema solo cumpra as suas funções para com os outros sistemas, é possível estudar e identificar as suas propriedades emergentes e entender qual a relação entre a magnitude delas e o estado de organização do sistema solo, a fertilidade e a produtividade das plantas. A fertilidade do solo não deveria mais ser pensada como uma propriedade restrita às condições químicas do solo, mas como produto das interações entre as condições químicas, físicas e biológicas do sistema solo, que possibilita o desenvolvimento e a produtividade das plantas.

4. ANALOGIA DA EVOLUÇÃO DA NOÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO E DA SUA PERCEPÇÃO NESTE MOMENTO À DOS SISTEMAS ABERTOS

Uma noção ou um conceito de fertilidade do solo é formado pela interação da atividade mental do homem sobre a fertilidade e o solo e pela sua percepção das respostas do solo e das plantas às suas atitudes (práticas agrícolas). Esta é influenciada pela cultura, pelo conhecimento e pela tecnologia disponível. Assim, a história da noção da fertilidade é a expressão destas interações nas diferentes épocas. Ao longo da evolução, muitas informações foram sendo agregadas e outras desconsideradas na noção de fertilidade (item 2.2.1) e se verifica atualmente uma insatisfação com o seu conceito mineralista (itens 2.2.1.3, 2.2.2 e 3.2).

A evolução dos sistemas abertos (Apêndice 8), que possuem certa autonomia que caracteriza a capacidade de auto-organização, foi descrita por Prigogine na “Teoria das Estruturas Dissipativas” (Prigogine & Stengers, 1992; Prigogine, 1996; Capra, 1996). Na sua evolução, são essenciais os efeitos do tempo, pois alguns acontecimentos ou eventos podem mudar a trajetória evolutiva do sistema e gerar novas coerências ou possibilidades de história. A auto-organização — emergência de novas propriedades e nova organização que induz o sistema a evoluir e atingir uma nova estabilidade de funcionamento (nível de ordem) nos pontos de bifurcação e a mudar o seu comportamento de maneira qualitativa — resulta dos efeitos combinados do não-equilíbrio, da irreversibilidade, dos laços de realimentação, dos fluxos de matéria e de energia, da instabilidade e da história do sistema.

A evolução da noção de fertilidade do solo (item 2.1.1), pelos fluxos de informação e de tecnologia, pela percepção diferente das pessoas nas diversas épocas, culturas e ambientes do solo e das plantas e da interação entre eles e das suas repostas às práticas agrícolas, pode ser interpretada de modo análogo à dos sistemas abertos (Apêndice 8). Por esse modelo, também é possível entender melhor as características dessa no momento atual.

4.1 Analogia da evolução da noção da fertilidade do solo à dos sistemas abertos

A evolução da noção de fertilidade do solo pode ser interpretada de modo análogo à dos sistemas abertos, considerando os períodos de estabilidade e de instabilidade e a geração de propriedades emergentes na mudança da noção de fertilidade no tempo (Figura 31). Os períodos de estabilidade (níveis de ordem) são aqueles de maior clareza e sustentam a noção de fertilidade por um tempo. Nesses, se tem um alto grau de satisfação com a noção, conseqüentemente com a sua avaliação e com as práticas recomendadas para aumentar ou manter (regenerar) a fertilidade. Os períodos de estabilidade são determinados pelos períodos de instabilidade ou pontos de bifurcação, que por sua vez são promovidos pela agregação de novas informações e tecnologia, pela trajetória evolutiva da noção da fertilidade e pela incapacidade das informações utilizadas expressarem a fertilidade. Os momentos que antecedem a concretização da mudança (surgimento da nova ordem: nova noção) são caracterizados por percepções contraditórias, por reflexão sobre os principais assuntos relacionados com a fertilidade e, muitas vezes, por comparações da abordagem destes assuntos com as inovações implementadas em outras áreas da Ciência. As mudanças qualitativas na noção de fertilidade são geradas nos pontos de bifurcação, podendo emergir além da nova noção ou conceito, modificações na avaliação e nas práticas recomendadas para regenerá-la. Enquanto esta nova noção ou conceito, que serve de base para a avaliação e as práticas, for amplamente aceita e utilizada, caracteriza-se um período de estabilidade, ou seja, uma nova organização do conhecimento da fertilidade predomina de acordo com a nova noção.

Na Antigüidade, os homens perceberam que havia algo de diferente entre os solos de tal modo que uns produziam mais que outros. A diferença mais perceptível aos da época era a coloração escura que alguns solos possuíam em relação a outros. Exatamente nesses, a produção era maior. Assim, a cor do solo passou a ser o indicador da primeira noção da fertilidade: “nutrimento das plantas” (na Figura 31, identificada como “a”). É possível considerar que, à época, a fertilidade era percebida sob duas faces. No início, não era possível, embora o homem primitivo tivesse tentado, cultivar sem arar a terra. Se a semente fosse espalhada e deixada à superfície do terreno,

apenas parte germinava. Isso implicava em rendimento baixo. Se, por outro lado, a terra fosse revolvida e a semente espalhada superficialmente e coberta por pequena camada de terra, a germinação era muito maior. Passou-se então a associar o "arar" com fertilidade, pois o resultado era a maior produtividade. Pode-se relacionar essa percepção com a face física da fertilidade. Evidentemente que esse processo repetido por centenas de vezes conduzia ao empobrecimento do solo. Abandonava-se, então, o terreno e cultivava-se noutra. Surgiu, assim, a noção do repouso como restaurador da fertilidade do solo. O repouso, no entanto, poderia ser entendido como face física, se a degradação fosse devido à erosão. Contudo, é mais provável que ocorresse a degradação química, pelo empobrecimento do solo, e essa podia ser recuperada pelo repouso. Nada mais era do que a ação de intemperismo e, em parte, alguma fixação de N da atmosfera. Portanto, essa seria a face química da fertilidade. Percebeu-se, evidentemente, que a adição de esterco tinha efeito muito mais rápido e maior que o repouso. Na época, também eram cultivadas espécies e incorporadas ao solo para seu benefício (adubação verde). Esta noção predominou por, pelo menos, 10.000 anos.

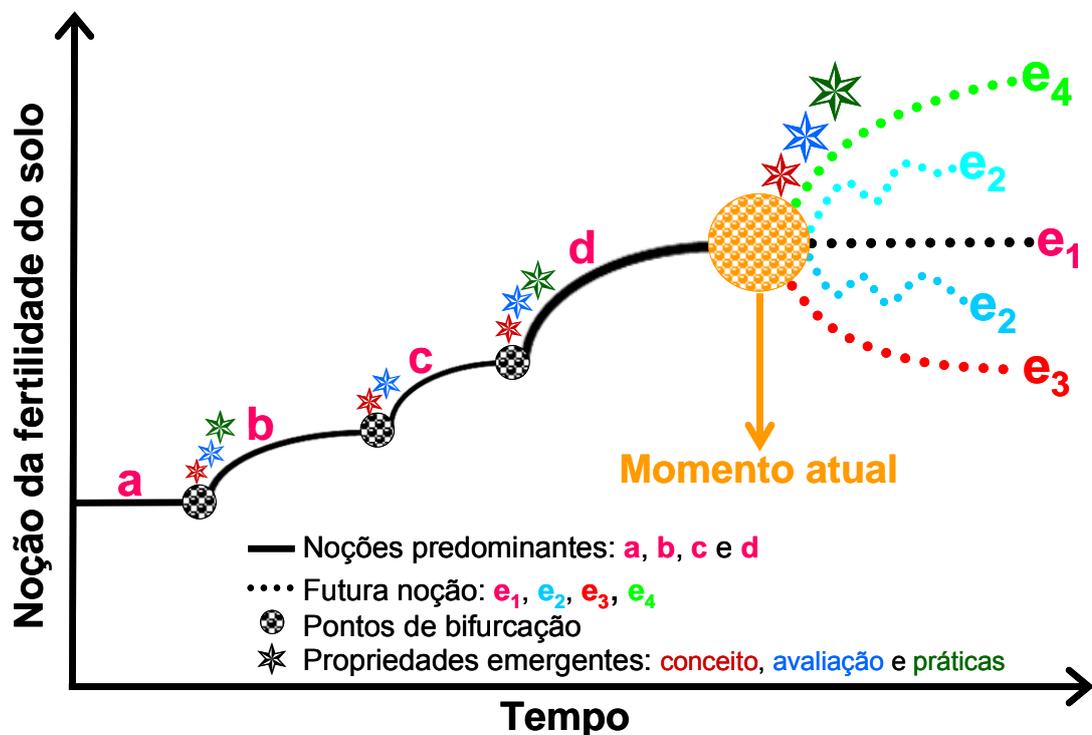


Figura 31. Principais noções da fertilidade do solo e análise da noção atual, interpretados de maneira análoga à evolução dos sistemas abertos [idéias defendidas por grupos que discutem a noção: "e₁": mineralista; "e₂": dúvidas; "e₃": divide a fertilidade; "e₄": nova; adaptado de Prigogine (1996)].

O principal fator que gerou insatisfação com esta noção “a” foi a redução na produção de alimentos causada pela diminuição da fertilidade devido às técnicas utilizadas e à exploração excessiva do solo. Esse também foi o motivo da revisão e/ou aprimoramento dos conhecimentos sobre a fertilidade na Antigüidade por Columella (42 d.C.). Em seu trabalho, consolidou a percepção anterior da fertilidade como “nutrimento das plantas”, mas acrescentou que ela é uma capacidade do solo continuamente renovável sugerindo, então, algumas mudanças na sua avaliação e nas práticas utilizadas para a sua regeneração (na Figura 31, identificada como “b”). Na avaliação da fertilidade substituiu a cor da terra por indicadores como “suco natural”, “gordura”, “fermento”, “consistência e o sabor da terra” e pelo “tipo de vegetação espontânea presente na área”. A principal prática recomendada por Columella para regenerar a fertilidade era a adubação, feita com esterco, marga etc., e o cultivo de espécies que serviam para adubar (leguminosas) quando incorporadas à terra (adubação verde). Ele também recomendava arar bem, mas não o repouso da terra. Além das faces química e física, como na noção anterior, nesta a face biológica da fertilidade também era considerada.

A essa noção, Ibn al Awam (século XII) acrescentou a percepção de que as plantas se nutrem de compostos minerais, estes aptos a nutri-las somente após a ação dos agentes meteorológicos sobre as rochas, e que a fertilidade de um solo adequada para uma espécie, pode não ser para outras. Gallo e Tarello (no século XVI) em nada alteraram a noção de fertilidade, apenas se referiram às práticas para regenerá-la. A diminuição dos períodos de repouso do solo e a compensação da fertilidade com alternância de espécies melhoradoras com exploradoras na rotação eram necessárias para intensificar a agricultura. Na rotação de culturas, parte da área cultivada com trigo deveria ser cultivada com trevo para pastagem dos animais, a fim de aumentar a produção de esterco e com isso aumentar a adubação e a produtividade do trigo. A noção de Columella (“b”) predominou por, pelo menos, 1.700 anos.

O surgimento das noções seguintes da fertilidade (na Figura 31, identificadas como “c” e “d”, respectivamente) foi estimulado, principalmente, pela técnica da experimentação (a partir do século XVII). Com esta, foram intensificados os estudos sobre a identificação do nutrimento ou do alimento das plantas. Assim, o alimento das plantas foi identificado nos sais nítricos, no

salitre, na água, na água e no ar e depois nas minúsculas partículas de terra. O uso da análise química do solo para entender a nutrição das plantas (Home, 1757) também contribuiu para entender melhor a fertilidade.

Uma nova noção de fertilidade surgiu quando o húmus foi identificado como o alimento das plantas (Wallerius, 1761). Logo, a fertilidade dependia exclusivamente da quantidade de húmus no solo (na Figura 31, identificada como “c”). Surgiu assim, a teoria humista da fertilidade do solo. No período em que esta noção de fertilidade prevaleceu, Thaer desenvolveu uma nova avaliação e Mitterpacher abordou as práticas para regenerá-la. No processo de avaliação de Thaer (1812), consideravam-se as proporções entre a fertilidade exportada e a restituída. Mitterpacher (1794) recomendou a não utilização do repouso por entender que degradava a terra. Provavelmente, verificou isso pela comparação dos efeitos do repouso e do cultivo com adição de esterco (o que era disponível na época) ou de nitrato de potássio. Nesse caso, o repouso é muito inferior na melhoria da fertilidade. É possível verificar nessa noção humista que a falta de conhecimento pode levar à formação de conceito errôneo ou incompleto. Há, sim, uma relação entre a fertilidade (essa expressa em produtividade) e o teor de húmus, mas a utilização do conteúdo isoladamente não indica fertilidade, pois um solo com alto teor de matéria orgânica pode ser de alto potencial produtivo, mas de baixa produtividade devido à presença de outros fatores. Provavelmente, a avaliação e as práticas para regenerar a fertilidade da noção “b” continuaram sendo utilizadas por, pelo menos, 100 anos, período em que a noção humista “c” predominou.

A técnica da experimentação também foi fundamental no surgimento da nova noção da fertilidade depois da humista. Com o progresso nas outras ciências (física, química etc.) no século XVIII, muito conhecimento novo foi transformado em tecnologia. A experimentação, com a tecnologia disponível para as determinações químicas, permitiu um progresso muito grande na identificação do(s) alimento(s) das plantas e o surgimento da noção mineralista da fertilidade. A última mudança concreta na noção de fertilidade foi determinada pelos trabalhos de Saussure (1804) e de Liebig (1842). Saussure demonstrou que não era o húmus, mas os sais minerais contidos no húmus e no solo o alimento das plantas e identificou os principais elementos minerais que deveriam ser restituídos ao solo pela adubação (adição de substâncias

capazes de liberá-los em formas solúveis ao solo). A teoria mineralista (na Figura 31, identificada como “d”) — a fertilidade é a riqueza do solo em elementos minerais — foi construída por Liebig com base no trabalho de Saussure. Assim, a base da noção de fertilidade passou a ser os sais solúveis presentes no solo em vez do húmus, a teoria mineralista em vez da humista.

A nova noção mineralista da fertilidade determinou o surgimento de novas metodologias de avaliação e mudanças nas práticas para sua regeneração. Liebig, quando identificou e determinou os nutrientes essenciais para a capacidade produtiva do solo pela análise química, quantificando fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre etc., estabeleceu a avaliação para a nova noção de fertilidade. Assim, a avaliação da fertilidade passou a ser feita pela análise química em amostras de solo em laboratório; a da noção de Columella, definitivamente, deixou de ser utilizada, inclusive o método das proporções de Thaer. A noção mineralista remodelou as práticas para regenerar a fertilidade; a adubação passou a ser a única prática recomendada como capaz de restituir os minerais exportados pelas colheitas. Isso determinou a diminuição do uso do repouso, da adubação verde, da adubação com esterco e da rotação de culturas. Nesta noção, as faces física e biológica deixaram de ser consideradas, embora a prática de arar o solo fosse utilizada sempre na época, a avaliação continuou a ser feita somente da sua face química. Outra contribuição importante à essa noção foi a de Gasparin ao considerar a fertilidade em relação ao grau de solubilidade dos elementos que as plantas assimilam do solo. Com essa percepção aprimorou a metodologia de avaliação e, com os resultados obtidos, calculou a necessidade de adubação. A identificação de muitos nutrientes essenciais às plantas e das proporções dos elementos para compor os adubos também reforçou essa noção.

A noção mineralista “d” predomina há um século e meio. Esta é a base do conceito tradicional de fertilidade do solo — fornecer nutrientes e manter a ausência de elementos tóxicos às plantas. Ainda no final do século XIX, essa noção ou conceito para expressar a fertilidade do solo percebida pelas plantas não satisfazia a muitos. Essa insatisfação aumentou no século XX, contudo, a noção mineralista continua predominando e sendo amplamente utilizada. Nesse, a avaliação da fertilidade foi aprimorada e o número de

indicadores químicos utilizados para avaliação, assim como a oferta e a eficiência dos adubos minerais e de corretivos de acidez e de alcalinidade do solo aumentaram. No século XX a noção de fertilidade utilizada não foi exatamente a mineralista conforme concebida por Liebig, mas “quase” a humomineralista, decorrente da percepção de Casali (1896) — um solo é fértil somente se possui na sua constituição determinada quantidade de húmus em relação aos minerais. Nesta concepção, além dos minerais, o teor de matéria orgânica do solo também é avaliado, assim se manteve a tendência de reduzir a fertilidade do solo apenas à reposição ou adição de elementos essenciais às plantas, ou seja, às condições químicas do solo.

4.2 Análise da noção da fertilidade do solo no momento atual

A partir do final do século XIX surgiram inúmeras percepções de fertilidade, diferentes da atual e entre si, porém nenhuma se impôs como uma nova noção, ou seja, nenhuma foi amplamente utilizada em substituição à mineralista. Entretanto, é evidente que o momento atual é propício à mudança da noção de fertilidade do solo, mas não é claro ainda e nem é possível prever exatamente qual será a nova noção. Essa evidência é sustentada na teoria pelas discussões surgidas há mais de um século no mundo (Item 2.2.1.3) e também no Brasil (Item 2.2.2), e na prática, pelos resultados que confirmam a insuficiência da noção tradicional para expressar a fertilidade percebida pelas plantas, principalmente em solos cultivados no SPD por muito tempo (Item 3.2).

No momento atual podem ser distinguidos principalmente quatro grupos de pensadores a defender noções de fertilidade. O primeiro grupo — Foth (1978); Hillel (1980); Coelho (1973); Soil Science Society of America (1993); Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (Cury et al., 1993); Tedesco (1995); Rheinheimer & Kaminski (2004); Lopes et al. (2004) — continua defendendo a noção mineralista, química ou tradicional da fertilidade (na Figura 31, identificada como “e₁”). O segundo grupo — Oliva (1939); Freire et al. (1988); Sims (1991); Mazzali (1994) — somente expressa dúvidas quanto ao conceito e, dependendo do momento defende a química e/ou a necessidade de uma nova noção (na Figura 31, identificada como “e₂”). O terceiro grupo — Oliva (1939); Casalicchio (1978); Hillel (1980); Zucconi (1996) — divide a fertilidade em várias e atribui a ela “denominações” conforme a área de

interesse, sem a preocupação de encontrar ou definir uma nova noção, assim não defende a noção mineralista e evita a reflexão sobre o assunto (na Figura 31, identificada como “e₃”). Os integrantes do quarto grupo — Cillis (1936); Scarponi (1949); Hausmann (1950); Catani et al. (1955); Mielniczuk et al. (2004); Nicolodi et al (2004a); D’Agostini (2006); Nicolodi (2006); Schlindwein (2006) — buscam um novo entendimento, isto é, defendem a necessidade de uma nova noção capaz de expressar melhor a única fertilidade do solo (na Figura 31, identificada como “e₄”).

As diversas percepções, as vezes contraditórias, confirmam a insuficiência da noção mineralista para expressar a fertilidade de alguns solos e evidenciam que esse é um momento propício ao surgimento de uma nova noção de fertilidade “e”, que poderá ocorrer em breve. Em relação a esta, é possível somente especular de onde pode surgir, o que ela pode contemplar, mas não prever qual e quando será amplamente utilizada, nem como será avaliada. Contra a opinião dos que sustentam a noção mineralista “e₁” existem, na prática, os resultados que comprovam a insuficiência desta noção (item 3.2) e, na teoria, a permanência dos outros grupos insatisfeitos (e₂, e₃ e e₄) com ela. A nova noção dificilmente surgirá dos grupos “e₂” e “e₃”, nem estes voltarão a se satisfazer com a noção mineralista. É provável que surja no grupo “e₄”, isso porque os componentes deste já perceberam e defendem a mudança na noção ou de um novo conceito para expressar melhor a fertilidade do solo percebida pelas plantas. Esse já superou a fase das dúvidas, refletiu mais sobre a fertilidade, sobre o solo e sobre a interação entre estes, o ambiente e às práticas agrícolas. Sabe-se, no entanto, que fertilidade deverá ser entendida de modo amplo, como resultado das interações entre as faces ou condições físicas, químicas e biológicas do sistema solo, ou seja, talvez como uma propriedade emergente do sistema solo. Entretanto, embora a avaliação possa ser diferente, às práticas comumente utilizadas para aumentá-la ou mantê-la — adubação mineral e orgânica (estercos e verde), correção da acidez ou alcalinidade — deverão ser acrescentadas a rotação e diversificação de culturas, o menor revolvimento do solo e a eliminação dos períodos de repouso. A aplicação do novo conceito deve aumentar e manter a fertilidade dos solos, assim como aumentar a produção de alimentos e de matéria-prima para o bem estar da humanidade e a preservar o ambiente.

5. FERTILIDADE COMO PROPRIEDADE EMERGENTE E SOLO COMO SISTEMA SEDE

O solo é um sistema aberto e tem seu funcionamento determinado pela interação entre os seus subsistemas e os sistemas do entorno. Essa interação é influenciada pelos fluxos que o permeiam. Assim, o sistema solo se mantém afastado do equilíbrio termodinâmico e está em constante evolução. O sistema solo é formado somente a partir da ação do sistema vida sobre o regolito ou da interação do sistema vida com a rocha matriz e com o clima. A partir da ação da pedogênese sobre o regolito, este transforma-se em solo e passa a ser dotado de fertilidade. Com a intensificação da interação entre os sistemas vida e solo, emerge a propriedade fertilidade. A percepção de que esta propriedade muda conforme o tipo de solo foi de grande importância, principalmente nos primeiros milênios de atividade agrícola (Saltini, 1984a).

O sistema solo tem seu funcionamento alterado pelas condições iniciais, pela magnitude dos fluxos de matéria e de energia e pelas interações entre seus subsistemas e os sistemas vida — composto pelos subsistemas planta, animal e homem — e clima. Conforme seu funcionamento, o sistema solo se auto-organiza em diferentes níveis de ordem e gera propriedades emergentes que o capacitam a exercer suas funções. Seu funcionamento pode ser entendido a partir da identificação das suas principais funções para com os sistemas e subsistemas e da interação com estes. As funções essenciais do sistema solo para o subsistema planta são: dar suporte físico para o desenvolvimento e para as trocas e armazenar e disponibilizar nutrientes, água e oxigênio. Estas funções são cumpridas pelos seus subsistemas estrutural e renovável, respectivamente. A interação entre estes subsistemas do sistema solo permite a emergência de inúmeras propriedades, entre elas a fertilidade, ou seja, desta interação emerge a fertilidade do sistema solo.

5.1. Solo, um sistema aberto

A percepção do solo, expressa no seu conceito, mostra que o seu entendimento foi aprimorado com a termodinâmica clássica ou do equilíbrio — adequada para o estudo dos sistemas fechados — mas o foi principalmente com a termodinâmica do não-equilíbrio — desenvolvida para compreender o funcionamento dos sistemas abertos — e com o modelo sistêmico.

No final do século XIX, o solo foi conceituado como depósito superficial de formação mineral e orgânica, mais ou menos colorido de húmus, resultado da ação mútua dos organismos vivos ou mortos (plantas e animais), do clima e do relevo (Dokuchaev, 1879). Até o século XX, prevaleceu o conceito de solo como meio para o crescimento das plantas (Saltini, 1984d); nesse, as raízes das plantas podem se apoiar, buscar nutrimento e outras condições para se desenvolver (Hilgard, 1914). Na década de 1930, a percepção do solo começou a mudar com o uso da termodinâmica clássica para aprimorar o seu entendimento. O solo foi entendido, então, como um corpo natural, não consolidado (Joffe, 1936); dinâmico, em equilíbrio com o ambiente (Kellogg, 1936); um organismo vivo (Pfeifer, 1938); e também como um sistema, em que seus componentes da fase sólida estão física e quimicamente em equilíbrio dinâmico com os das fases líquida e gasosa (Camargo & Vageler, 1938).

Entretanto, o entendimento do solo como um sistema aberto foi proposto pela primeira vez por Jenny (1941), resultado das interações entre o clima, os organismos, o relevo, a rocha matriz e o tempo de formação. Faz parte dos muitos grandes sistemas de que é composta a parte superior da litosfera, a inferior da atmosfera e uma considerável parte da biosfera, e substâncias podem ser adicionadas e removidas dele. Dez anos mais tarde, Denbigh (1951), trabalhando com sistemas, concluiu que o conceito de equilíbrio da termodinâmica clássica não era válido para sistemas abertos como o solo. Em 1973, Runge (1973) considerou em seus estudos o solo como um sistema aberto, e Chesworth (1973) usou a termodinâmica do não-equilíbrio para entendê-lo.

O sistema solo tem uma organização hierárquica muito complexa e é formado por uma rede de relações (Rozanov, 1975) entre seus subsistemas (Dijkerman, 1974). Os fluxos de matéria e de energia através dos subsistemas

("skeletron", "solution" e "plasma") do sistema solo interferem na sua pedogênese (Hugget, 1976). Essa dinâmica é alterada com o tempo, por isso a sua formação é um processo irreversível (Yallon, 1975). Segundo Chatelin et al. (1982), isso mostra a importância da dedicação, principalmente dos pedólogos, para entender o solo com base na Teoria Geral dos Sistemas de Bertalanffy. Porém, com a aplicação desta teoria ao seu estudo, este não pode mais ser analisado pela ação de um fator isolado. Nos sistemas de maior complexidade, como é o solo, os elementos são interligados de tal modo que a mudança de um fator tem um efeito imediato na mudança dos outros fatores (Rozanov, 1982). Assim, o sistema solo deve ser entendido com base na termodinâmica que trata das condições de não-equilíbrio e dos processos irreversíveis (Neil et al., 1983). Segundo Phillips (1993), o seu funcionamento deve ser estudado numa concepção sistêmica ou holística, devido às suas relações serem não-lineares e dinâmicas. No Brasil, Almeida et al. (1988) descreveram o solo como um sistema complexo, vivo e dinâmico que serve também de suporte para o desenvolvimento das plantas, as quais fornecem alimentos e matérias-primas para a atividade e o bem estar da humanidade.

Addiscott (1995), baseado na Teoria Geral dos Sistemas e na termodinâmica do não-equilíbrio de Prigogine (Apêndice 8), propôs que o solo seja entendido como um sistema aberto, que troca energia e matéria com o ambiente, se mantém afastado do equilíbrio termodinâmico e é caracterizado por produção mínima de entropia, pela predominância de processos de ordenação sobre os de dissipação ao longo do tempo. Mielniczuk et al. (2000) conceituaram o solo como um sistema aberto e complexo, composto por uma intrincada rede de relações entre os subsistemas mineral, plantas e organismos. O subsistema mineral é a consequência do intemperismo na acidez e na disponibilidade de nutrientes no solo; o subsistema plantas é o cultivo de plantas no solo, com a consequente adição de material orgânico, energia e ciclagem de nutrientes; e o subsistema organismos é a atividade da fauna e dos microrganismos do solo (Vezzani, 2001).

Assim, há pelo menos seis décadas, o solo é entendido como um sistema aberto, em função dos fluxos de matéria e de energia que influenciam o seu funcionamento e a sua evolução. É um sistema gerado pela interação entre a rocha matriz, o clima e a vida prolongada no tempo, tem espessura

variável e ocupa a maior parte do manto superficial da extensão continental do planeta terra, que tem seu funcionamento determinado pela interação entre os seus subsistemas, influenciada pelos fluxos que o permeiam. Entretanto, a idéia e a nomenclatura dos subsistemas adotados neste trabalho são diferentes das utilizadas anteriormente (“skeletron”, “solution” e “plasma”) por Hugget (1976) e (vegetal, organismos e matéria mineral) por Mielniczuk et al. (2000), Vezzani (2001), Conceição (2002) e Schmitz (2003).

No sistema solo, a parte sólida (mineral e orgânica) determina as propriedades e características físicas e químicas e a vida existente no solo, que também são influenciadas pelas partes líquida e gasosa, e as reações (trocas de energia e de matéria) no solo ocorrem em função da vida, tanto animal (organismos e microrganismos) como vegetal (plantas). Neste trabalho, são tratadas as principais interações com o sistema solo — formado pelos subsistemas planta, animal⁷ e homem — que se estabelecem entre este e os sistemas clima e vida (Figura 32).

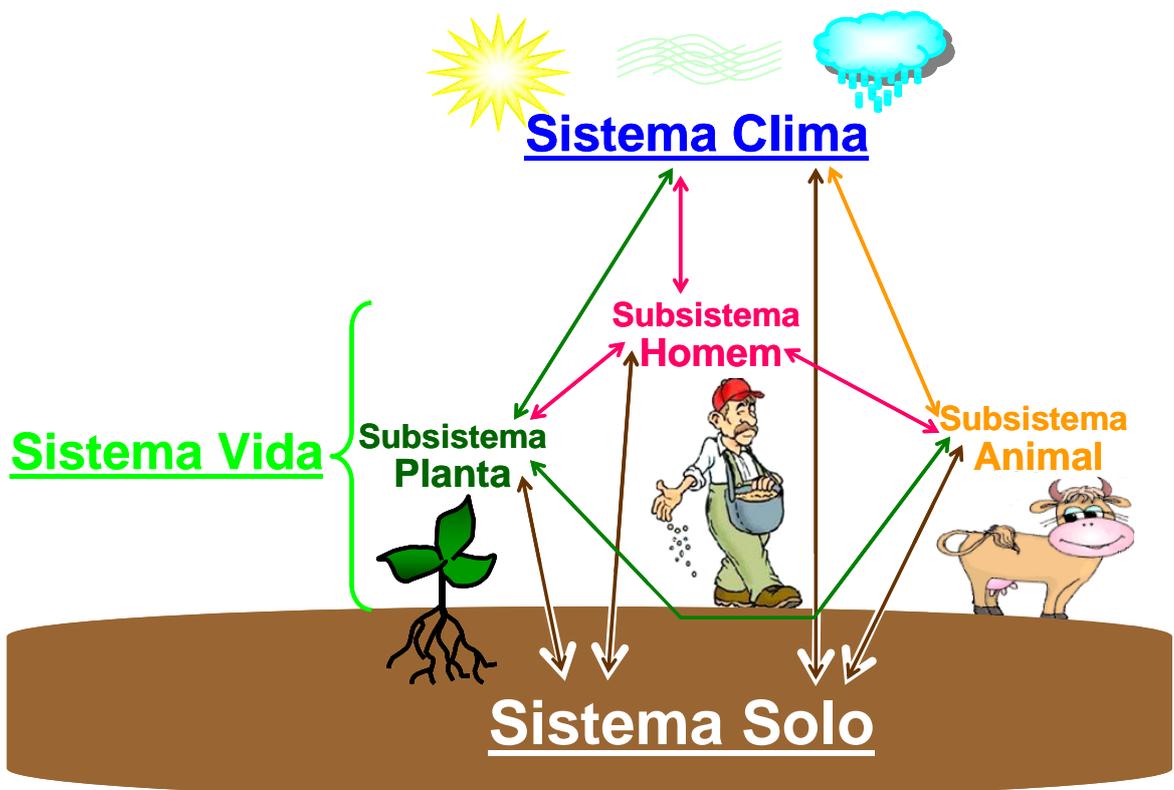


Figura 32. Principais sistemas e subsistemas que interagem com o sistema solo.

⁷Neste trabalho, são componentes do subsistema animal todos os seres vivos que não pertencem aos subsistemas planta ou homem.

5.2. Formação do sistema solo e da sua fertilidade

O sistema solo é formado indiretamente da interação entre o regolito ou saprólito, resultante da ação do clima sobre a rocha matriz, e a vida ou diretamente da interação entre a rocha matriz, o clima e a vida. Nesse processo, o regolito é estéril, depende da presença de água e de elementos nutritivos para ter fertilidade e tornar-se adequado à vida das plantas superiores. O acúmulo destes fatores, que diferenciam o regolito e o solo, depende dos processos de erosão e da pedogênese. O primeiro conduz à aquisição da água e termina na fase de regolito. O segundo submete as substâncias nutritivas no solo aos ciclos geológico (liberação dos elementos minerais) e biológico (síntese e destruição da substância orgânica). No ciclo biológico, o desenvolvimento da fertilidade é determinado pela sucessão das associações vegetais, relevo e rocha matriz num determinado ambiente. Para que o regolito se torne fértil, ou seja, se transforme em solo, são necessárias modificações qualitativas promovidas pelo processo de humificação. Somente depois da ação da vida sobre o regolito, este pode se transformar em solo. O solo, por definição, é um corpo natural caracterizado por determinado grau de fertilidade. Esta é uma propriedade dinâmica resultante de múltiplos processos evolutivos ligados à gênese do solo, possibilita o acesso contínuo dos fatores terrestres de crescimento como a água e os elementos nutritivos às plantas e é a causa da produtividade das plantas que reside de maneira específica no solo (Hausmann, 1950).

Com o passar do tempo, a intensidade das interações entre a rocha matriz, o clima e a vida (planta, animal e homem) aumenta e acelera o processo de formação do solo. A mudança na intensidade das interações se reflete no grau de complexidade e tipo do solo formado (Figura 33). De acordo com as características do clima, da rocha matriz e, principalmente, da vida, que promove a transformação do regolito em solo, se forma um ambiente do qual emerge determinada fertilidade. Com a intensificação da interação entre a vida e o solo formado, emerge a propriedade fertilidade melhor que capacita o solo a dar as condições para o bom desenvolvimento a um número maior de espécies de plantas. A partir da percepção de que os solos têm diferentes fertilidades, o homem começou a utilizar essa informação na seleção dos solos para a agricultura e para a pecuária.

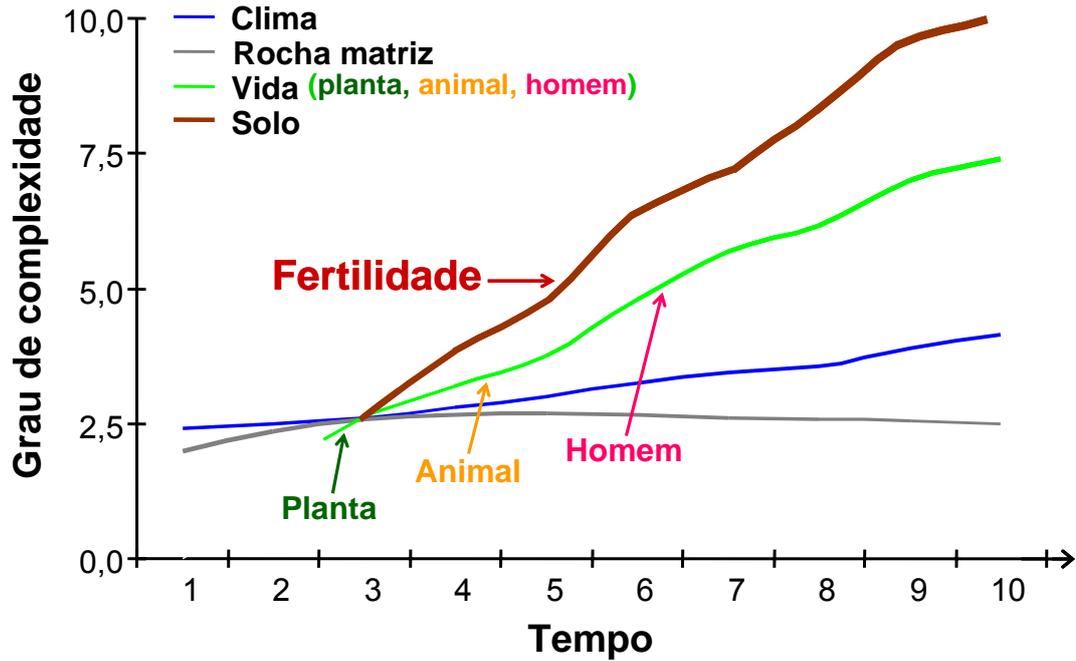


Figura 33. Relação entre o aumento do grau de complexidade do solo formado e da sua fertilidade pelas interações entre o clima, a rocha matriz e a vida no tempo.

5.3. Funcionamento e funções do sistema solo

Funcionamento se refere à manutenção do padrão de organização entre os elementos que compõe e mantêm a “unidade” do sistema, ao cumprimento das funções do sistema de interesse e ao seu desempenho no cumprimento destas para com os principais sistemas e subsistemas que ele interage. O funcionamento do sistema é influenciado pelas ações e reações dos sistemas e subsistemas com os quais interage. Por isso, percebeu-se que o funcionamento do sistema do solo pode ser entendido a partir da identificação das suas principais funções ou propósitos para com os sistemas e subsistemas que ele interage e destes para com ele. Conseqüentemente, para entender o seu funcionamento, é importante conhecer os principais elementos, forças e interações que estimulam os processos que possibilitam ao sistema solo o cumprimento das suas funções.

O sistema solo tem o funcionamento alterado pelas condições iniciais (tipo de solo), pela magnitude dos fluxos de matéria e de energia (espécies e intensidade de cultivo) e pelas interações entre seus subsistemas. Conforme o seu funcionamento, o sistema solo se auto-organiza em diferentes níveis de ordem e gera propriedades emergentes que o capacitam a exercer

suas funções (Vezzani, 2001; Conceição, 2002; Schmitz, 2003). Alterando-se o funcionamento, muda-se também a sua trajetória evolutiva no tempo. Em consequência do funcionamento e da trajetória evolutiva do solo, constantemente em formação pela ação da vida sobre o regolito ou sobre a rocha matriz, emerge uma fertilidade, pior ou melhor.

As funções do solo são estudadas por ser ele um sistema resultante da coexistência de múltiplos componentes (químicos, físicos e biológicos), que determina a sua fertilidade e influencia profundamente a vida das plantas (Bonciarelli, 1980). Estas e os animais são as principais fontes de alimentos do homem. Assim, a partir da década de 1990, as funções começaram a ser identificadas, principalmente em pesquisas sobre qualidade⁸ do solo, embora raramente na literatura seja mencionado como são cumpridas (Larson & Pierce, 1991; Doran & Parkin, 1994; Larson & Pierce, 1994; Biswas & Mukherjee, 1995; Brady & Weil, 2002; Gregorich, 2002). As funções do sistema solo identificadas por esses autores são:

- 1) Servir como meio para o crescimento das plantas:
 - 1.1. Ancorar as raízes;
 - 1.2. Receber, reter e liberar nutrientes; e
 - 1.3. Receber, reter e liberar água;
- 2) Servir de habitat para os organismos do solo;
- 3) Servir como meio para obras de engenharia humana;
- 4) Regular os fluxos de água, de gases e de energia no ambiente;
- 5) Reciclar os materiais *in natura* e os produtos de descarte;
- 6) Responder ao seu manejo e resistir à sua degradação;
- 7) Sustentar a produtividade biológica;
- 8) Promover a saúde do homem, das plantas e dos animais;
- 9) Sustentar a vida de todas as criaturas.

A partir da revisão das funções, identificadas por esses autores, se conclui que para entender melhor o objeto de estudo, no caso o solo, as funções foram atribuídas de acordo com o entendimento e necessidade de cada autor. Isso não significa que o objeto realmente tenha essas funções; trata-se de um artifício útil para entender melhor como interagem outros objetos com o objeto de interesse. Como a fertilidade do sistema solo é essencial para

o desenvolvimento e a produtividade das plantas, que são fundamentais para a alimentação dos animais e dos homens, as funções do solo apresentadas a seguir são “atribuídas”, neste trabalho, para o sistema vida, separadamente para os seus subsistemas planta (1), animal (2) e homem (3).

1) Funções essenciais do sistema solo para o subsistema planta:

1.1. Dar suporte físico para o desenvolvimento e para as trocas;

1.2. Armazenar e disponibilizar nutrientes, água e oxigênio.

2) Funções essenciais do sistema solo para o subsistema animal:

2.1. Dar suporte físico para viverem sobre ou no interior do solo;

2.2. Servir de meio para produzir alimentos (cumprir a função 1).

3) Funções essenciais do sistema solo para o subsistema homem:

3.1. Dar suporte físico para viverem sobre o solo (cumprir a função 2.1.);

3.2. Servir de meio para produzir alimentos (cumprir a função 2.2.);

3.3. Purificar a água (cumprir a função 1.2.);

3.4. Tamponar a temperatura (cumprir a função 1.1.).

Devido ao interesse nas condições do sistema solo que possibilitam o desenvolvimento e a produtividade das plantas, é dada ênfase, neste trabalho, às funções do sistema solo para com o subsistema plantas, que são cumpridas pelos seus subsistemas estrutural e renovável. O subsistema estrutural representa as condições que permitem às raízes das plantas crescerem e, ao mesmo tempo, dá espaço e ancoragem. O subsistema estrutural cumpre a função de dar suporte físico para o desenvolvimento e para as trocas para o subsistema planta. O renovável representa as condições que possibilitam às plantas, através das suas raízes, absorverem no solo o que for necessário para formarem a sua estrutura, crescerem e se reproduzirem. O subsistema renovável cumpre, portanto, a segunda função do sistema solo de armazenar e disponibilizar nutrientes, água e oxigênio para o subsistema planta. O subsistema estrutural é mais estável que o renovável; este é mais dinâmico sendo o estrutural, principalmente de controle endógeno e o renovável, exógeno.

A função do subsistema estrutural para o planta é cumprida pela interação entre as partículas do solo (areia, silte e argila), os ligantes químicos

⁸ Qualidade é o grau de ajustamento de um solo para um uso específico, ou seja, sua habilidade ou capacidade de servir a uma função específica (Gregorich, 2002).

(CTC e CTA) ou orgânicos (exudatos e matéria orgânica) e a força (trabalho), gerada pelo crescimento das raízes e pelo movimento dos animais e da água no processo de agregação do solo. Os principais indicadores do seu cumprimento são: crescimento das raízes, capacidade de infiltração de água, proporção de agregados de dimensões diversas e resistência do solo à deformação. A função do subsistema renovável para o planta é cumprida pela interação entre a presença de água, de nutrientes, de oxigênio, de superfície reativa (CTC e CTA), e da fauna e dos microrganismos, por um processo químico, de equilíbrio elétrico entre a fase sólida e a solução do solo, e por outro químico-biológico, de transformação dos nutrientes em formas assimiláveis pelas plantas (ciclagem de nutrientes estimulada pelos organismos vivos). Os principais indicadores do cumprimento desta função do solo são: água disponível, CTC e CTA, atividade de comunidades biológicas específicas, reserva e disponibilidade de nutrientes.

A função de servir como meio para produzir alimentos para os subsistemas animal e homem é cumprida pela interação entre os subsistemas estrutural e renovável. Essa interação determina as condições dadas pelo sistema solo para o desenvolvimento e a produtividade das plantas. Logo, o sistema solo, com seus subsistemas estrutural e renovável, cumpre as suas principais funções para o sistema vida que são: 1) dar suporte físico; 2) armazenar e disponibilizar nutrientes, água e oxigênio; 3) servir como meio para produzir alimentos; 4) purificar a água; e 5) tamponar temperatura.

5.4. Fertilidade: uma propriedade emergente do sistema solo

A interação entre os subsistemas estrutural e renovável do sistema solo permite a emergência de inúmeras propriedades, entre elas a fertilidade (Figura 34). A fertilidade é a propriedade emergente⁹ do sistema solo que proporciona as condições necessárias para o sustento da vida das plantas (desenvolvimento e produção em abundância); logo, ela só se manifesta na presença delas. Como consequência, o sistema solo cumpre a sua função de produzir alimentos para os subsistemas animal e homem e também matérias primas para satisfazer as necessidades humanas.

⁹ Nas figuras representadas pelo símbolo estrela.

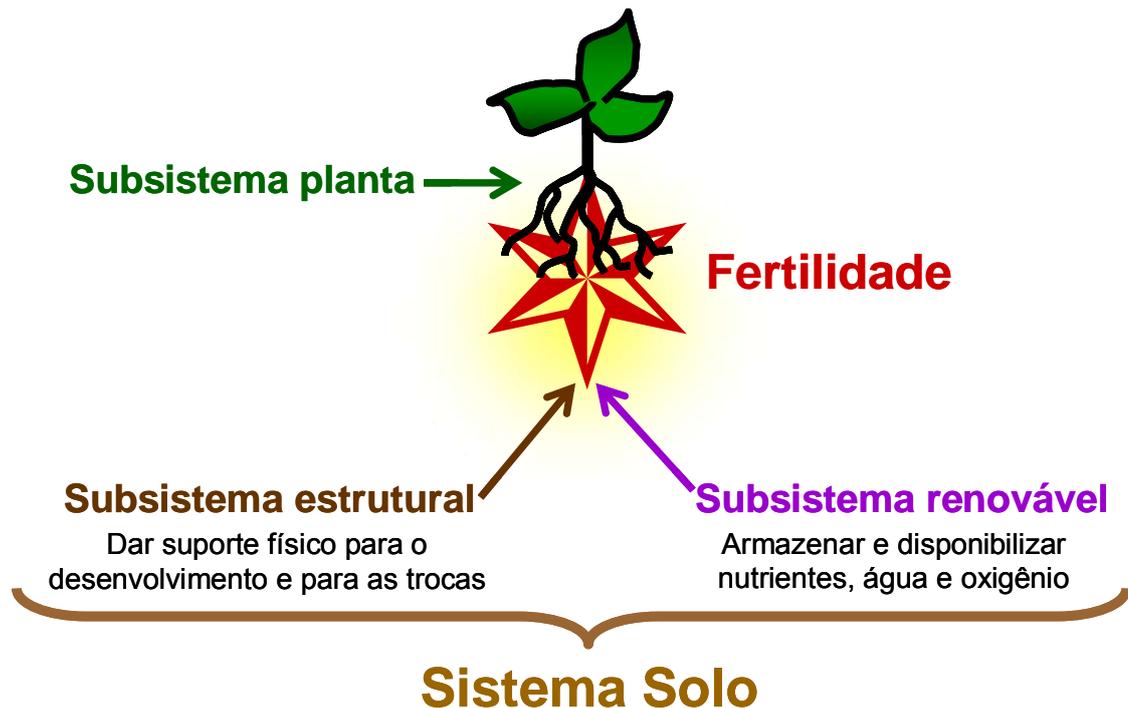


Figura 34. Fertilidade: uma propriedade emergente da interação entre os subsistemas estrutural e renovável do sistema solo.

Fertilidade é um termo utilizado em Ciência do Solo para expressar o resultado da ação dos fatores de produção no rendimento (grão, matéria seca, teor de óleo etc.) de uma cultura. Não é constituinte do solo e não se pode atribuir a ela uma medida direta. É uma propriedade projetada pelo homem para entender melhor “o algo real” existente no solo, percebido e necessário para a produtividade da planta. Assim, para avaliá-la, estimam-se outros parâmetros e, pela grandeza destes, se determina o grau de fertilidade de um solo. Isso, no entanto, é relativo, pois a expressão da fertilidade não depende só dos fatores de solo, mas também do clima e, principalmente, da espécie cultivada — pode ser adequada a um tipo de planta, mas não a outro.

A interação entre o clima e as características topográficas de uma superfície (topocaracterística) determina diferentes topoclimas. As condições meteorológicas se referem às pequenas mudanças no clima durante o ciclo da cultura, que afetam o seu ciclo, mas são insuficientes para alterar o topoclima. O desenvolvimento e a produtividade das plantas, freqüentemente caracterizados como potencial do solo, são determinados pela interação entre o subsistema planta (particularidades da espécie cultivada) e o ambiente específico, formado pela fertilidade do sistema solo, pelo sistema vida e pelas condições meteorológicas (Nicolodi, 2006; Figura 35).



Figura 35. Produtividade: uma propriedade emergente da interação entre o subsistema planta, o sistema vida e um ambiente específico.

A agricultura é caracterizada pelo uso de um ambiente específico pelo homem, componente do sistema vida (Figura 36). A agricultura gera basicamente dois produtos: um chamado de produtividade (alimentos, grãos, matéria seca etc.: produto primário); e outro de resíduo (raízes e parte aérea: produto secundário). A quantidade e a qualidade do produto primário e secundário dependem da interação entre o ambiente específico e o subsistema planta. A consequência disso é, ou deveria ser, a realimentação ou a regeneração dos subsistemas renovável e estrutural pelos resíduos das plantas e pela adição de fertilizantes (adubos e corretivos). Assim, nesse ciclo, se constrói a fertilidade que emergirá a cada cultivo do sistema solo. Os produtos da agricultura servem principalmente para alimentar e satisfazer outras necessidades dos subsistemas homem e animal. Esses interferem nos subsistemas que concorrem para a sua geração. O produto primário é a principal fonte de lucro da agricultura, e o secundário serve de alimento para os organismos que vivem no solo e para a proteção do mesmo. Para o homem, em geral gestor do ambiente, conhecer as principais interações entre o sistema solo, o sistema vida — através de seus subsistemas planta, animal e homem — e o topoclima, assim como as que influenciam a geração da fertilidade é fundamental para a sua melhoria ou manutenção, bem como do sistema solo, para a sustentabilidade na agricultura e para a melhoria e preservação do ambiente.

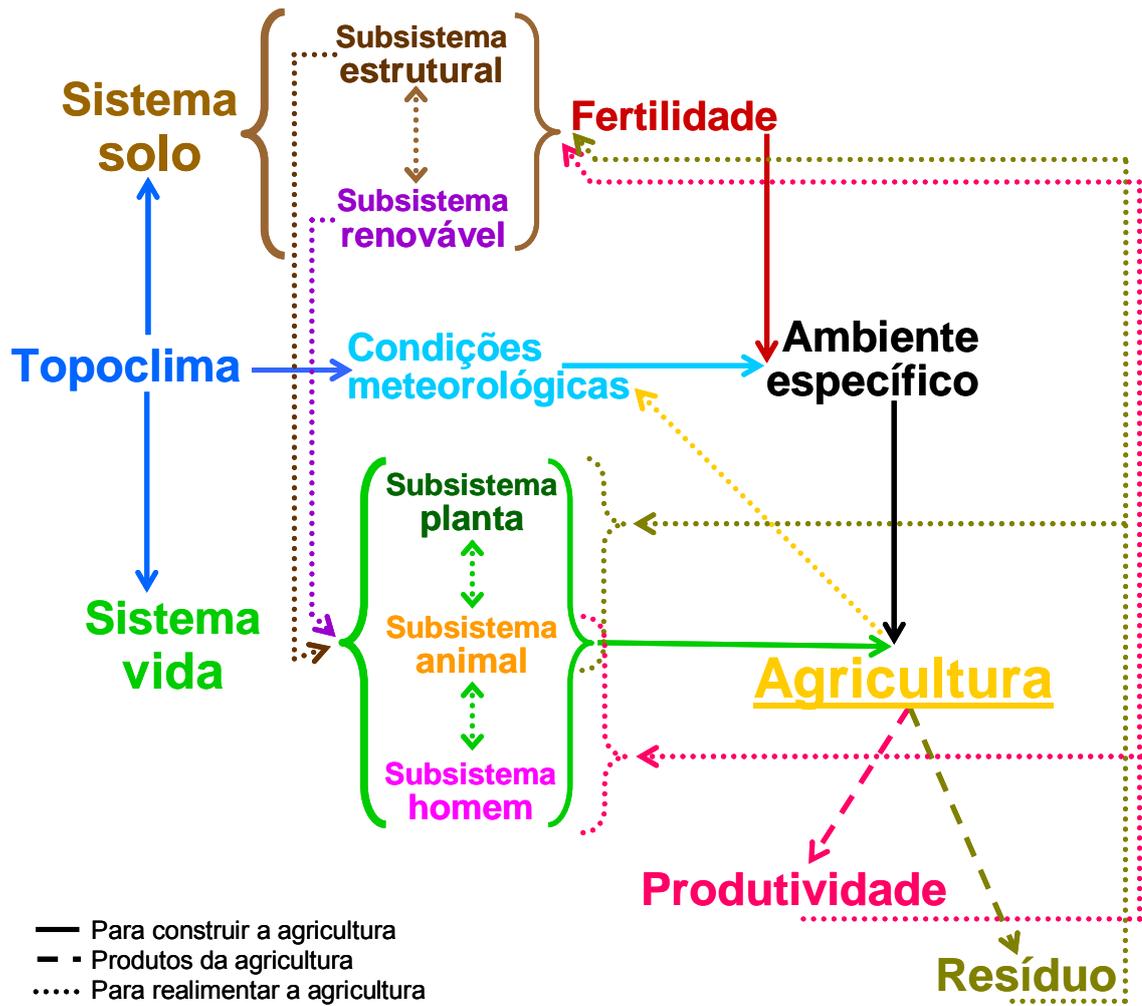


Figura 36. Principais interações que possibilitam a continuidade da agricultura.

6. POSSÍVEIS AÇÕES PARA MELHORAR A AVALIAÇÃO E A FERTILIDADE DO SOLO

6.1. A noção da fertilidade do solo no futuro

A reflexão sobre a evolução da noção e sobre a insuficiência do conceito tradicionalmente utilizado indica que o momento atual é propício à importante mudança na noção de fertilidade. Pela revisão histórica e pela inquietação que, com freqüência, surge em relação à fertilidade do solo, um novo conceito para esta deverá ser construído em breve, com alterações também na sua avaliação e nas práticas para aumentá-la e mantê-la. Talvez coexistam mais de um conceito de fertilidade numa mesma época, o tradicional para solos cultivados no SC e um novo construído principalmente para os solos cultivados no SPD com diversificação de espécies na rotação de culturas. Afinal, um conceito não é algo imutável.

Com base nesse novo conceito, a fertilidade dos solos cultivados no SPD não será avaliada somente por indicadores químicos e estes não serão necessariamente os mesmos utilizados no SC; se forem os mesmos, provavelmente, os teores críticos serão alterados. Além disso, é necessário avaliar as condições biológicas e físicas do sistema solo, ou seja, os indicadores da fertilidade devem expressar o funcionamento dos seus subsistemas renovável e estrutural. Entre os indicadores do subsistema renovável poderiam estar o fósforo disponível, o nitrogênio total, a CTC efetiva, teor e taxa de decomposição da matéria orgânica e/ou umidade do solo. Embora estes tenham sido os mais sensíveis em expressar as alterações do sistema de cultivo não o foram para o rendimento de grãos, que é o principal indicador da fertilidade do sistema solo (Figuras 26 e 27). Também poderiam ser utilizados como indicadores deste subsistema o CO na fração do solo <53 µm (Figura 37) ou a atividade de enzimas para avaliações específicas (Figura 38). Como indicadores do subsistema estrutural poderiam ser avaliados a capacidade de retenção de umidade (Figuras 26, 27 e 37) e a distribuição dos diâmetros dos agregados em classes (Figura 10).

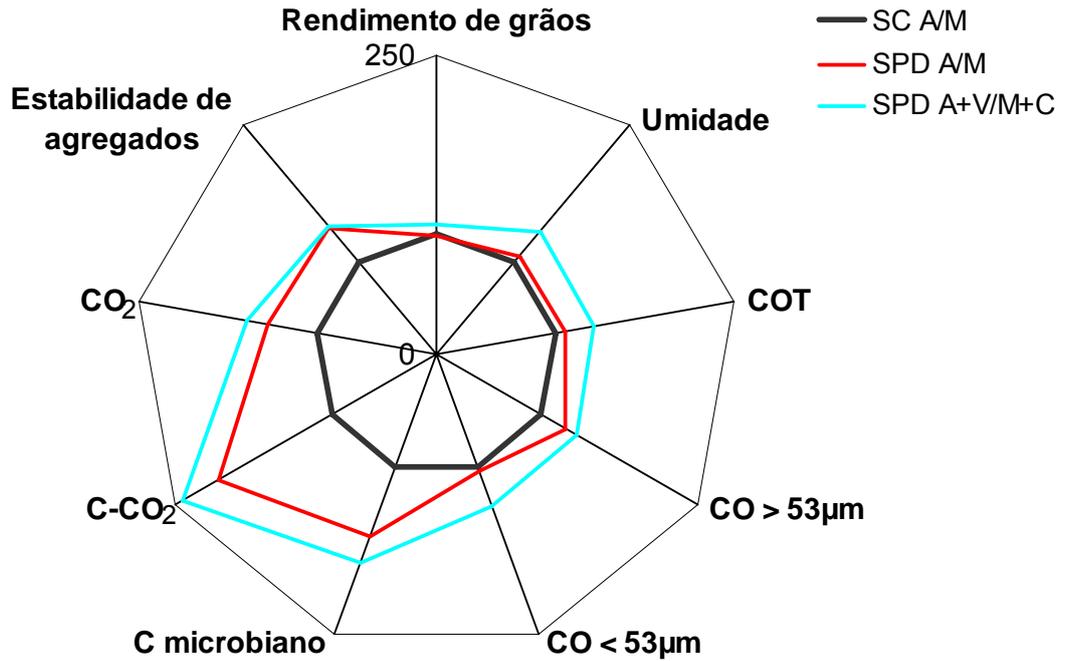


Figura 37. Representação integrada (%) do rendimento de grãos de milho com indicadores das condições químicas, físicas e biológicas do sistema solo avaliados aos 15 anos do experimento conduzido em Eldorado do Sul, nas parcelas com 180 kg ha⁻¹ de N [PVd: umidade, COT e CO: 0-10 cm; CO₂ e EA: 0-7,5 cm; C microbiano e C-CO₂: 0-5 cm; referência: 100% = SC A/M sem N; adaptado de Conceição (2002)].

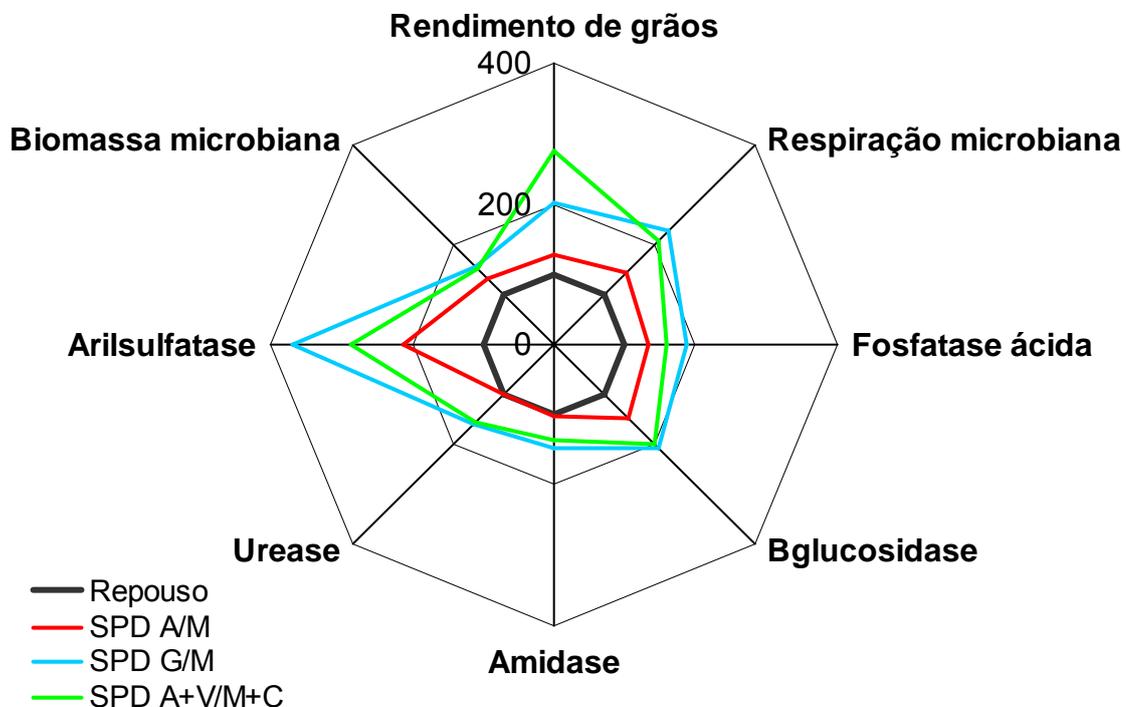


Figura 38. Representação integrada (%) do rendimento de grãos de milho com indicadores biológicos do sistema solo no SPD com diferentes rotações de culturas, avaliados aos 19 anos do experimento conduzido em Eldorado do Sul, nas parcelas com 180 kg ha⁻¹ de N [PVd: 0-10 cm; referência: 100% = R; adaptado de Schmitz (2003)].

Um sistema de avaliação de fertilidade, com base no cumprimento das funções pelos subsistemas estrutural e renovável do solo, poderia, eventualmente, também ser considerado. Assim, um solo não tem fertilidade se um ou ambos os subsistemas não cumprem com sua função para o subsistema plantas. É rara essa situação, pois nada cresceria no solo. Por outro lado, um solo tem fertilidade se os dois subsistemas cumprem com as suas funções para as plantas. Nesse caso, a fertilidade é baixa quando esse cumprimento é feito com dificuldade ou é alta se é feito com facilidade. Ao cumprir adequadamente a função de sustentação e nutrimento para o subsistema planta, através dos subsistemas estrutural e renovável, o sistema solo também cumpre a função para os subsistemas animal e homem, através do subsistema planta, de produzir alimentos, ou seja, o sistema vida depende do funcionamento dos subsistemas estrutural e renovável do sistema solo.

6.2. Práticas para aumentar e manter a fertilidade do sistema solo

As principais práticas agrícolas promovidas pelo homem que influenciam o funcionamento do sistema solo e, conseqüentemente, a sua fertilidade são: a diversidade de vida presente nele durante o ano, o sistema de cultivo, o manejo dos resíduos das plantas, a taxa de revolvimento e a correção dos teores dos nutrientes e da acidez ou alcalinidade do solo. Para melhorar a capacidade de cumprir as suas funções, ou seja, para um bom funcionamento do sistema solo, deve-se estimular a contínua interação entre ele e os subsistemas planta, animal e homem conforme o topoclima. Isto pode ser feito através de interferência nos sistemas solo e vida.

O funcionamento do sistema solo pode ser melhorado interferindo nos seus subsistemas estrutural e renovável. As principais práticas para um bom funcionamento do subsistema estrutural são: 1) estimular a diversidade de vida (plantas e microrganismos); 2) manter sempre o solo cultivado; e 3) evitar o revolvimento do solo e o uso de máquinas agrícolas com solo muito úmido. Com estas práticas, é possível aumentar a superfície reativa e intensificar a força mecânica que promove a agregação do solo e assim permitir ao solo cumprir adequadamente a primeira função para o subsistema planta. Para que haja um bom funcionamento do subsistema renovável, além dos três itens

mencionados anteriormente, é necessário manter alto o nível de disponibilidade de nutrientes no solo. Essas práticas estimulam a ciclagem e a reserva de nutrientes, aumentam a superfície reativa, melhoram a agregação do solo (continuidade de poros, infiltração e circulação de água e trocas gasosas) e facilitam o cumprimento da segunda função do sistema solo para o subsistema planta, que é a armazenagem e disponibilidade de nutrientes, água e oxigênio.

As principais práticas para bom funcionamento do sistema solo são: estimular o bom funcionamento dos subsistemas estrutural e renovável através da diversidade de vida (plantas e microrganismos); corrigir o solo (nutrientes e acidez ou alcalinidade); e manter o solo sempre cultivado com espécies de diferentes sistemas radiculares que adicionem alta quantidade, e qualidade, de material orgânico ao solo. Assim, estimula-se também a emergência de uma fertilidade de magnitude¹⁰ maior, pois a magnitude da fertilidade resulta da interação entre os subsistemas do sistema solo. Para a agricultura (produção de grãos), as práticas para bom funcionamento do sistema solo — com a geração de fertilidade melhor — são o cultivo intensivo do solo no SPD com diversificação de espécies na rotação de culturas, ausência de elementos tóxicos e a alta disponibilidade de nutrientes para as plantas.

O funcionamento do sistema solo pode também ser potencializado através do funcionamento do sistema vida. Este pode ser melhorado pela diversidade de espécies utilizadas para o desenvolvimento e produtividade de todos os seres vivos e pela seleção de espécies e cuidados no estabelecimento das culturas (qualidade da semente, época de semeadura, sistema de cultivo, rotação, controle de ervas daninhas, patógenos, parasitas e fornecimento de nutrientes). Assim, é possível manter o equilíbrio entre diversidade de vida num topoclima para obter qualidade de vida para todos.

6.3. A fertilidade do sistema solo e a sustentabilidade na agricultura

Não existe agricultura sem fertilidade do solo; a agricultura só é sustentável num solo com alta fertilidade. Os indicadores de fertilidade — esta uma propriedade emergente do funcionamento do solo como um todo — são

¹⁰ As propriedades emergentes não são previsíveis como certezas de valor, mas como tendência de comportamento (melhor, no caso da fertilidade maior, ou pior, no caso menor).

os mesmos da sustentabilidade da agricultura. A fertilidade, dizia Columella em 42 d.C., é uma capacidade do solo continuamente renovável pelas práticas agrícolas adequadas e adubação abundante. A “função” do subsistema homem é estimular esta renovação ou regeneração continuamente, assim a agricultura será sustentável, evitando a escassez de alimentos e o aumento das áreas degradadas e/ou desérticas. O estímulo à regeneração da fertilidade deve ser feito com base na diversificação de culturas, utilizando as práticas agrícolas adequadas não somente às espécies cultivadas, mas também ao topoclima, a fim de que a produtividade aumente, e o ambiente não se degrade.

7. CONCLUSÕES

No estudo da evolução da noção da fertilidade do solo, são evidentes duas percepções: uma ampla denominada de “nutrimento das plantas”, que integra as condições físicas, químicas e biológicas do solo, da Antigüidade ao fim da Idade Média, e outra limitada “ao alimento (elementos) das plantas”, restrita às condições químicas do solo, da Idade Moderna à Contemporânea.

O conceito da fertilidade do solo que surgiu no século XIX — fornecimento de nutrientes e ausência de elementos tóxicos para as plantas — aumentou a fertilidade dos solos, principalmente dos ácidos e pobres em nutrientes e, conseqüentemente, a produtividade das culturas — isso foi verificado também no Planalto do Rio Grande do Sul nos últimos 40 anos — sendo responsável pelo maior progresso da Humanidade em agricultura.

A capacidade dessa noção em expressar a fertilidade do solo percebida pelas plantas vem sendo questionada na teoria desde o final século XIX. Os resultados de campo deste trabalho confirmaram, na prática, a insuficiência do conceito mineralista da fertilidade do solo ao não relacionar adequadamente os indicadores tradicionais da fertilidade com o rendimento das culturas, principalmente nos solos cultivados no sistema plantio direto por longo período de tempo.

A análise dos dados obtidos na literatura e neste trabalho permite concluir que o momento atual tem elementos teóricos e práticos suficientes — a noção atual mineralista é insuficiente para expressar a fertilidade percebida pelas plantas — para promover mudança na noção da fertilidade do solo.

A fim de expressar melhor a fertilidade percebida pelas plantas principalmente nos solos cultivados no sistema plantio direto, um novo conceito deve ser construído considerando o solo como um sistema aberto, que funciona afastado do equilíbrio termodinâmico e se auto-organiza em novos estados de ordem, sendo a fertilidade uma propriedade emergente, cuja magnitude é função do nível de ordem do sistema solo.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADDISCOTT, T.M. Entropy and sustainability. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.46, n.2, p.161-168, 1995.

ALMEIDA D.L.; SANTOS A.G.; DE-POLLI, H. et al. **Manual de Adubação para o Estado do Rio de Janeiro**. 2ed. Itaguaí: Ed. Universidade Rural, 1988. 179p.

ANGHINONI, I. Fertilidade do solo no ambiente subtropical. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30., 2005, Recife, PE. **Palestras...** Recife: SBCS, 2005. CD ROM.

ANGHINONI, I.; SALET, R.L. Amostragem de solo e as recomendações de adubação e calagem para o sistema plantio direto. In: NUERNBERG, N.J. (Ed.). **Conceitos e fundamentos do sistema plantio direto**. Lages: SBCS/ Núcleo Regional Sul, 1998. p.27-52.

ASCAR - Associação Sulina de Crédito e Assistência Rural. **Plano estadual de melhoramento da fertilidade do solo**. Porto Alegre, 1969. 67p.

ASSOCIAÇÃO RURAL DE SANTA ROSA. **Projeto de melhoramento da fertilidade do solo de Santa Rosa**. Santa Rosa, 1967. 37p.

BALOTA, E.L.; COLOZZI-FILHO, A.; ANDRADE, D.S.; HUNGRIA, M. Biomassa microbiana e sua atividade em solos sob diferentes sistemas de preparo e sucessão de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, p.641-649, 1998.

BAYER, C. **Características químicas do solo, nutrição e rendimento do milho afetados por métodos de preparo e sistemas de culturas**. 1992. 183f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1992.

BAYER, C. **Dinâmica da matéria orgânica em sistemas de manejo de solos**. 1996. 240f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, n.1, p.105-112, 1997.

BERTALANFFY, L.v. **Teoria geral dos sistemas**. 3ed. Petrópolis: Vozes, 1977. 351p.

BISWAS, T.D.; MUKHERJEE, S.K. **Textbook of soil science**. 2ed. New Delphi: Tata Mcgraw-Hill, 1994. p.1-6.

BONCIARELLI, F. **Agronomia**. Bologna: Edagricole, 1980. 322p.

BONETTI, L.P. “**De santa a pecadora...**” – a saga da soja pelos campos do Rio Grande. Cruz Alta: [s.n.], 1988. 134p.

BRADY, N.C.; WEIL, R.P. **The nature and properties of soils**. New Jersey: Prentice Hall, 2002. 1000p.

BRASIL, Ministério da Agricultura. **Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Rio Grande do Sul**. Recife, 1973. 431p. (Boletim Técnico, 30).

BURLE, M.L. **Efeito de sistemas de cultura em características químicas do solo**. 1995. 105f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

CAMARGO T.; VAGELER P. O solo na sua concepção moderna. In: INSTITUTO AGRONÔMICO DO ESTADO. **Os solos do Estado de São Paulo II**. Campinas: Imprensa Oficial do Estado, 1938. 30p. (Boletim Técnico, 49).

CAPRA, F. **A teia da vida**: uma nova compreensão científica dos sistemas vivos. São Paulo: Cultrix, 1996. 256p.

CARBALLO, A.M.C. **Atributos químicos do solo afetado por métodos de preparo e sistema de culturas**. 2004. 83f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de latossolos roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.14, p.99-105, 1990.

CASALICCHIO, G. **Chimica agraria: il terreno**. Bologna: Ed. Clueb, 1978. p.301-433.

CASSOL, E.A. **Erosão do solo**: Influência do uso agrícola, do manejo e preparo do solo. 2.ed. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1986. 40p.

CASALI, A. **L’Humus la fertilità e l’igiene dei terreni culturali**. Milano: Ulrico Hoepli, 1896. 220p.

CATANI R.A.; GALLO J.R.; GARGANTINI H. **Amostragem de solo, métodos de análise interpretação e indicações gerais para fins de fertilidade**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 1955. 28p. (Boletim, 69).

CATTELAN, A.J. **Sistemas de culturas e os microorganismos do solo**. 1989. 152f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

CHATELIN, Y.; RICHARD, J.F.; LENEUF, N. Modeles verbaux et transdisciplinarité dans l'étude de sols et des paysages. **Pedologie**, Paris, v.29, p.51-63, 1982.

CHESWORTH, W. The residua systems of chemical weathering: a model for the chemical breakdown of silicate rocks at the surface of the earth. Tunisia. **Pedologie**, Paris, v.10, p.69-81, 1973.

CILLIS, E. de **Trattato delle coltivazione**: agronomia. Roma: Agricoltura Fascista, 1942. 581p.

CIOTTA, M.N.; BAYER, C.; ERNANI, P.R. et al. Acidificação de um Latossolo sob plantio direto. Viçosa, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Paris, v.26, p.1055-1064, 2002.

COELHO, F.S. **Fertilidade do solo**. 2 ed. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1973. 384p.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO RS/SC. **Manual de adubação e de calagem para o estado do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre: SBCS/Núcleo Regional Sul: UFRGS, 2004. 400p.

CONCEIÇÃO, P.C. **Avaliação de sistemas de manejo visando a avaliação da qualidade do solo**. 2002. 125f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

CONCEIÇÃO, P.C. **Agregação e proteção física da matéria orgânica em dois solos do sul do Brasil**. 2006. 139f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

D'AGOSTINI, L.R. Noção de sistema: (re)emergindo fértil em solos, fertilidade do solo (re)emergindo sistêmica. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 6., 2006. Passo Fundo, RS. **Palestras...** Passo Fundo: SBCS/Núcleo Regional Sul, 2006. CD-ROM.

DALLA ROSA A. **Práticas mecânicas e culturais na recuperação de características físicas de solos degradados pelo cultivo – solo Santo Ângelo (Latossolo Roxo distrófico)**. 1981. 136f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1981.

DENARDIN, J.E. Enfoque sistêmico em sistema plantio direto – fundamentos e implicações do plantio direto nos sistemas de produção agropecuária. In: NUERNBERG, N.J. **Conceitos e fundamentos do sistema plantio direto**. Lages: SBCS/Núcleo Regional Sul, 1998. p.7-14.

DENARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A.; FLORES, C.A. et al. Agricultura conservacionista – sistema plantio direto. In: DENARDIN J.E.; KOCHHANN, R.A.; FLORES, C.A. et al. **Manejo de enxurrada em sistema plantio direto**. Porto Alegre: Fórum Estadual de Solo e Água, 2006. 88p.

DENBIGH, K.G. **The thermodynamics of the steady state**. New York: Wiley, 1951. 103p.

DIEKOW, J. **Estoque e qualidade da material orgânica do solo em função de sistemas de culturas e adubação nitrogenada no sistema plantio direto**. 2003. 164f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

DIJERKMAN, J.C. Pedology as a science: the role of data theories in the study of natural soil systems. **Geoderma**, Amsterdam, v.11, p.73-93, 1974.

DOKUCHAEV, V.V. **Mapping the Russian Soils**. St. Petesburg, Russia: Imperial Univ. of. St. Petersburg, 1879.

DORAN, J.W.; PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W. et al. (Eds) **Defining soil for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p.3-21. (Special Publication, 35).

DRESCHER, M. ; BISSANI, C.A.; GIASSON, E. et al. **Avaliação da fertilidade dos solos do estado do Rio Grande do Sul e necessidades de adubos e corretivos**. Porto Alegre: Depto de Solos da UFRGS, 1995. 24p. (Boletim Técnico, 7)

EMATER/RS - Associação Riograndense de Empreendimentos de Assistência Técnica e Extensão Rural. **Contém informações institucionais, técnicas, notícias, projetos, publicações e serviços**. Disponível em: <http://www.emater.tche.br>. Acesso em 15/01/2007.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Brasília: Serviço de Produção de informação, 1997. 247p.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Serviço de Produção de informação, 1999. 412p.

ENCICLOPEDIA AGRARIA ITALIANA. Roma: Ramo Editoriali degli Agricoltori, 1952. 1166p.

FOTH, H.D. **Fundamentals of soil science**. 6ed. New York: John Willey & Sons, 1978. p.22-24.

FREIRE, L. R.; CUNHA, L. H.; SANTOS, G. A. et al. Fertilidade do Solo. In: ALMEIDA D.L.; SANTOS A.G.; DE-POLLI, H. et al. **Manual de Adubação para o Estado do Rio de Janeiro**. 2ed. Itaguaí: Ed. Universidade Rural, 1988. p.13-23.

FREIRE, J.R.; COSTA, J.A.; STAMMEL, J.G. Principais fatores que propiciaram a expansão da soja no Brasil. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v.92, p.39-47, 2006.

FREITAS, V.H. **Eficiência de sistemas de preparo do solo e de culturas no fornecimento de nitrogênio para o milho**. 1988. 148f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.

GREGORICH, E.G. Quality. In: LAL, R. (Ed.) **Encyclopedia of Soil Science**. New York: Marcel Dekker, 2002. p.1058-1061.

HAUSSMANN, G. **L'evoluzione del terreno e l'agricoltura: correlazione tra i processi pedogenetici, la fertilità, la técnica e le rese delle colture agrarie**. Torino: Giulio Einaudi Editore, 1950. p.20-114. 432p.

HILGARD, E.W. **Soils**. New York: The McMillan, 1914.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. London: Academic Press, 1980. p.3-20.

HUGGETT, R.J.; YAALON, D.H.; CHESWORTH, W. Conceptual models in pedogenesis – a discussion. **Geoderma**, Amsterdam, v.16, p.261-266, 1976.

JASTER, F.; ELTZ, F.L.F.; FERNANDES, F.F. et al. **Rendimento de grãos em diferentes sistemas de preparo e manejo de solos**. Londrina: EMBRAPA, 1993. 37p. (Boletim Técnico).

JENNY, H. Ecosystems and soil. In: THE SOIL resources. [S.l.: s.n.], 1941. p.2-18. (Ecological studies, 37)

JOFFE, J.S. **Pedology**. New Jersey: Rutgers University Press, 1936.

KAMINSKI, J. et al. Proposta de nova equação para determinação do valor de H+Al pelo uso do índice SMP em solos do RS e de SC. In: REUNIÃO ANUAL DA REDE OFICIAL DE LABORATÓRIOS DE ANÁLISE DE SOLO E DE TECIDO VEGETAL DOS ESTADOS DO RIO GRANDE DO SUL E DE SANTA CATARINA, 33., 2001, Frederico Westphalen. **Anais...** Frederico Westphalen: SBCS/Núcleo Regional Sul - ROLAS, 2001. p.21-26.

KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D.S. A acidez do solo e a nutrição mineral das plantas. In: KAMINSKI, J. (Ed.). **Uso de corretivos da acidez do solo no plantio direto**. Pelotas: SBCS/Núcleo Regional Sul, 2000. p.21-40.

KAPPEL, P.S. **Plano de melhoramento da fertilidade do solo em Santa Rosa**. Santa Rosa: ASCAR, 1967. 10p.

KELLOGG, C.E. **Development and significance of the great groups of the United States**. [Washington]: U.S. Dept. Agric. 1936. (Misc. Pub, 229).

LARSON, W.E.; PIERCE, F.J. Conservation and enhancement of soil quality. In: EVALUATION FOR SUSTAINABLE LAND MANAGEMENT IN THE DEVELOPING WORLD, 2., 1991, Bangkok, Thailand. **Proceedings...** Bangkok: IBSRAM, 1991.

LARSON, W.E.; PIERCE, F.J. The dynamics of quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J.W. et al. (Eds) **Defining soil for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p.37-51. (Special Publication, 35).

LOPES, A.S. et al. **Sistema plantio direto: bases para o manejo da fertilidade do solo**. São Paulo: ANDA, 2004. 110p.

LOVATO, T. **Dinâmica do carbono e nitrogênio do solo afetada por preparos do solo, sistemas de culturas e adubo nitrogenado.** 2001. 130f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

MALAVOLTA E. As ciências agrícolas no Brasil. In: FERRI, M.G.; MOTOYAMA, S. (Eds.), **História das ciências no Brasil.** São Paulo: Ed. da Universidade de São Paulo, 1981. v.3., p.104-149.

MALAVOLTA E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações.** 2ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319p.

MAZOYER, M.; ROUDART, L. **História das agriculturas no mundo do neolítico à crise contemporânea.** Lisboa: Instituto Piaget, 2001. 520p.

MAZZALI, E. **Il terreno e la nutrizione delle piante.** Bologna: Edagricole, 1994. p.1-91.

MERTEN, G.H. **Rendimento de grãos e distribuição do sistema radicular das culturas sob diferentes sistemas de manejos em um Oxissolo (Latosso Roxo distrófico).** 1988. 178f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.

MIELNICZUK, J.; ANGHINONI, I. Avaliação da utilização das recomendações de adubo e calcário dos laboratórios oficiais de análises de solos. **Revista Trigo e Soja**, Porto Alegre, v.15, p.3-6, 1976.

MIELNICZUK J. ; LUDWICK, A.E. ; VOLKWEISS, S.J. et al. **Estudos iniciais de calibração de análises para fósforo e potássio do solo com a cultura do trigo.** Porto Alegre: Faculdade de Agronomia e Veterinária da UFRGS, 1969. 10p. (Mimeografado)

MIELNICZUK, J.; WÜNSCHE, W.A.; FERREIRA, T. Conservação do solo. **Revista Trigo e Soja**, Porto Alegre, v.66, p.17-21, 1983.

MIELNICZUK, J. Manejo do solo no Rio Grande do Sul: uma síntese histórica. **Revista Agronomia**, Porto Alegre, v.12, p.11-22, 1999.

MIELNICZUK, J.; RHEINHEIMER, D. S; VEZZANI, F. M. **Interações fertilidade e conservação do solo.** In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, FERTBIO, 25., 2000, Santa Maria, RS. **Palestras...** Santa Maria: SBCS, 2000. CD ROM.

MOHR W. **A influência da acidez sobre a fertilidade dos solos.** Porto Alegre: [s.n.], 1960. 23p

NEIL, E.; SMECK, E.C.A.; RUNGE E.C.A. et al. Dynamics and genetic modeling of soil systems. In: WILDING L.P. et al. **Pedogenesis and soil taxonomy.** [S.l.: s.n.], 1983. p.51-81.

NICOLODI, M. Desafios à caracterização de solo fértil em química do solo. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 6., 2006. Passo Fundo, RS. **Palestras...** Passo Fundo: SBCS/ Núcleo Regional Sul, 2006. CD-ROM.

NICOLODI, M. **Indicadores para a tomada de decisão para a calagem no sistema plantio direto**. 2003. 102f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

NICOLODI, M.; GIANELLO, C.; ANGHINONI, I. Fertilidade: uma propriedade do sistema solo. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 5., 2004, Florianópolis, SC. **Resumos...** Florianópolis: SBCS/ Núcleo Regional Sul, 2004a. CD-ROM

NICOLODI, M.; GIANELLO, C.; ANGHINONI, I. Relação entre a disponibilidade de nutrientes e a resposta da soja no contexto da fertilidade como propriedade emergente do sistema solo. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 5., 2004. Florianópolis, SC. **Resumos...** Florianópolis: SBCS/ Núcleo Regional Sul, 2004b. CD-ROM

NOSKOSKI, C. **Análise econômica do uso de corretivos na cultura do trigo, safra 1969 – Ibirubá/RS**. 1971. 93f. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Economia Rural e Sociologia Rural, Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1971.

ODUM, E.P. **Basi di ecologia**. Padova: Piccin Nuova Libreria, 1988. 544p.

OLIVA, A. **La teoria agronomica della fertilità**. Roma: Ramo Editoriali degli Agricoltori, 1939. p.1-13.

PAVINATO, A. **Teores de carbono e nitrogênio do solo e produtividade de milho afetados por sistemas de culturas**. 1993. 122f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1993.

PFEIFER, E. **Fruchtbarkeit der erde, ihre erhaltung und erneuerung; das biologisch-dynamische prinzip in der natur**. Basel: Zbinden & Hügin, 1938. 184p.

PHILLIPS, J.D. Stability implications of state factor model of soils as a nonlinear dynamic system. **Geoderma**, Amsterdam, v.58, p.1-15, 1993.

PILLON, C. N. **Alterações no conteúdo e qualidade da matéria orgânica do solo induzida por sistemas de culturas em plantio direto**. 2000. 232f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

PONS, M.A. **História da agricultura**. Caxias do Sul : Maneco, 1998. 240p.

PORTO, M.D.M. **Levantamento da fertilidade e necessidades de fertilizantes e corretivos dos solos do RS**. 1970. 97f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1970.

PRIGOGINE, I. **O fim das certezas**. São Paulo: Ed. Estadual Paulista, 1996. 199p.

PRIGOGINE, I. **Il futuro é già determinato?** Roma: Di Renzo Editore, 2003. 93p.

PRIGOGINE, I.; STRENGERS I. **Entre o tempo e a eternidade**. São Paulo: Cia das Letras, 1992. 225p.

RHEINHEIMER, D.S. **Dinâmica do fósforo em sistema de manejo de solos**. 2000. 211f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

RHEINHEIMER D.S. et al. **Situação da fertilidade dos solos no estado do RS**. Santa Maria: Depto de Solos da UFSM, 2001. 41p. (Boletim Técnico, 2)

RIOJA, J.; NOLLA, D. **Plano de melhoramento da fertilidade do solo em Ibirubá**. Ibirubá: ASCAR, 1969. 10p.

RODRIGUES, R.M. **O solo e a vida**. 2ed. São Paulo: Moderna, 2005. 56p.

ROTINI, O. T. **Gli elementi fitonutritivi e la fertilita del terreno**. Bologna: Edagricole, 1994. 227p.

ROZANOV, B.G. **Genetical soil morphology**. Moscow: Mosc. Univ. Press., 1975.

ROZANOV, B.G. Methodological bases of modern soviet soil science and its future development. **Pedologie**, Paris, v.29, p.79-90, 1982.

RUNGE, E.C.A. Soil development sequences and energy models. **Soil Science**, Madison, v.115, p.183-193. 1973.

SÁ J.C. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: SIQUEIRA J.O et al. (Eds) **Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. Lavras: SBCS, 1999. p.267-319.

SALET, R.L. **Toxidez de alumínio no sistema plantio direto**. 1998. 117f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

SALTINI, A. **Storia delle scienze agrarie: dalle origini al rinascimento**. Bologna: Edagricole, 1984a. Vol I. 530p.

SALTINI, A. **Storia delle scienze agrarie: i secoli della rivoluzione agraria**. Bologna: Edagricole, 1984b. Vol II. 725p.

SALTINI, A. **Storia delle scienze agrarie: l'età della macchina a vapore e dei concime industriali**. Bologna: Edagricole, 1984c. Vol III. 446p.

SALTINI, A. **Storia delle scienze agrarie: l'agricoltura al tornante della scoperta dei microbi**. Bologna: Edagricole, 1984d. Vol IV. 568p.

SCARPONI, F. **Il concetto della fertilità nella sua evoluzione attraverso i tempi.** Milano: [s.n.], 1949. 16p.

SCHLINDWEIN, J.A. **Calibração de métodos de determinação e estimativa de doses de fósforo e potássio em solos sob sistema plantio direto.** 2003. 169f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SCHLINDWEIN, S.L. A noção de fertilidade em solos e sua metáfora. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 6., 2006. Passo Fundo, RS. **Palestras...** Passo Fundo: SBCS/ Núcleo Regional Sul, 2006. CD-ROM.

SCHMITZ, J.A.K. **Indicadores biológicos de qualidade do solo.** 2003. 254f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SEQUI, P. **Chimica del suolo.** Bologna: Patron, 1989. p.331-334.

SIMS, J.T. Soil fertility evaluation In: SUMNER, M.E. **Handbook of Soil Science.** New York: Boca Raton, 1999. p.D113- D153.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Vocabulário de Ciência do Solo.** Campinas, 1993. 90p.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. **Glossary of soil science terms.** Madison, 1987. 144p.

SECRETARIA DA AGRICULTURA E ABASTECIMENTO DO RS. **Macrozoneamento Agroecológico e Econômico.** Porto Alegre, 1994.

TEDESCO M.J. Importância do estudo da fertilidade do solo. In: GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; TEDESCO, M.J. **Princípios de fertilidade do solo.** Porto Alegre: Depto de Solos da UFRGS, 1995. p.1-7.

TEDESCO M.J. et al. Avaliação da fertilidade dos solos do RS. **Revista Agronomia Sulriograndense,** Porto Alegre, 20, p.179-194,1984.

TEDESCO, M.J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais.** 2ed. Porto Alegre: Depto de Solos da UFRGS, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5)

TEIXEIRA, L.A.J. **Fornecimento de nitrogênio ao milho por sistemas de culturas.** 1988. 96f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.

TESTA, V.M. **Características químicas de um podzólico vermelho-escuro, nutrição e rendimento de milho afetados por sistemas de culturas.** 1989. 134f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1989.

TISDALE S.L.; NELSON, W.L.; BEATON, J.D. Soil fertility — past and present. In: TISDALE S.L.; NELSON, W.L.; BEATON, J.D. **Soil fertility and fertilizers**. 5 ed. New York: Macmillan, 1993. p.2-13.

OCHOA G.D. **A água é um factor regulador da fertilidade do solo**. Porto Alegre: Instituto Experimental de Viamão, 1926. 12p. (Boletim, 8).

VEZZANI, F. M. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. 2001. 184f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

VIEIRA, F.C.B. **Estoques e labilidade de MO e acidificação de um Argissolo sob plantio direto afetados por sistemas de cultura e adubação nitrogenada**. 2007. 124f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

VOLKWEISS, S.J.; KLAMT E. “Operação Tatu” – um programa de aumento da produtividade agrícola. **Lavoura arroeira**, Porto Alegre, v.22, p.37-41, 1969.

WIETHÖLTER, S. **Calagem no Brasil**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. 104p.

WIKIPEDIA. **[Informações]**. Disponível em: <http://www.wikipedia.org>. Acesso em 20/11/2006.

WÜNCHE, W.A.; DENARDIN, J.E.; MIELNICZUK, J. et al. Projeto integrado de uso e conservação do solo – um esforço conjunto para a conservação do solo no Rio Grande do Sul. **Revista Trigo e Soja**, Porto Alegre, v.51, p.20-25, 1980.

WÜNCHE, W.A.; DENARDIN, J.E. **Conservação e manejo dos solos: I**. Planalto Rio-Grandense. Considerações Gerais. Passo Fundo: EMBRAPA Trigo, 1980. 20p. (Circular Técnica, 2)

YALLON, D.H. Conceptual models in pedogenesis: can soil-forming functions be solved? **Geoderma**, Amsterdam, v.14, p.189-205, 1975.

ZANATTA, J.A. **Estoque e labilidade do carbono em frações da matéria orgânica de um Argissolo afetados por sistemas de manejo de solo**. 2006. 113f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

ZUCCONI, F. **Declinio del suolo e stanchezza del terreno**. Padova: Spazio Verde, 1996. 291p.

9. APÊNDICES

Apêndice 1: Evolução da fertilidade em solos do Planalto do RS (Material e métodos)

A evolução da fertilidade é avaliada pela comparação das frequências das faixas de interpretação e pelos valores médios dos seus indicadores em levantamentos com abrangência determinada pelo objetivo de cada estudo. Os levantamentos podem ser feitos a partir de resultados de análises de amostras de solo enviadas pelos agricultores aos laboratórios da Rede Oficial de Laboratórios de Análises de Solos RS/SC - ROLAS ou de resultados de análises de amostras coletadas especificamente para avaliar a fertilidade dos solos de um município ou de uma região.

Nos últimos 40 anos, foram feitos quatro grandes levantamentos de fertilidade baseados nas amostras de solos enviadas aos laboratórios da ROLAS: o primeiro, em 1968 com 27.814 análises (Porto, 1970), o segundo, em 1981, com 41.226 análises (Tedesco et al., 1984), o terceiro, em 1988, com 58.528 análises (Drescher et al., 1995) e o último de 1997 a 1999 com 168.200 análises (Rheinheimer et al., 2001). Antes desses, levantamentos específicos foram feitos para conhecer a fertilidade dos solos por município com as “Operações Tatu”: em 1966, com 3.050 amostras de solo coletadas em Ibirubá (Noskoski, 1971) e, em 1967, com 2.300 amostras de solo em Santa Rosa (Carpenedo, 1967); e por região, em 1967 em dez regiões fisiográficas do RS, cujos resultados foram utilizados no Plano Estadual de Melhoramento da Fertilidade do Solo (ASCAR, 1969). Outros levantamentos específicos foram feitos, em 1975, para avaliar os resultados da “Operação Tatu” em 20 lavouras nos municípios de Espumoso, Tapera e Santa Rosa (Mielniczuk & Anghinoni, 1976), e em 1984, em 100 lavouras em Ibirubá pela EMATER (dados não publicados). Os resultados desses levantamentos foram encontrados, exceto os de Ibirubá feito em 1966, e utilizados nesta avaliação da evolução da fertilidade nos solos da região produtora de grãos do Planalto do RS.

A principal ação desenvolvida no RS com objetivo estritamente relacionado à fertilidade dos solos foram as “Operações Tatu”, que iniciaram em Ibirubá e em Santa Rosa. Por isso e pela história agrícola desses municípios, eles podem representar com a precisão desejada a região produtora de grãos e também pela disponibilidade de informações da década de 1960 sobre a fertilidade de seus solos, esses municípios tiveram a sua

fertilidade avaliada neste trabalho. Assim, é possível comparar os resultados dos levantamentos feitos pelos laboratórios com os levantamentos específicos por município e aumentar o grau de confiabilidade nas informações na evolução da fertilidade nos solos do Planalto.

Em Ibirubá, como não foram encontrados os resultados do levantamento feito em 1966, foram avaliadas lavouras distribuídas em seis localidades no município. Em Santa Rosa, foram disponibilizados 100 laudos de análises das amostras de solo coletadas em 1967, o que possibilitou selecionar, dentro do grupo de agricultores identificados naqueles laudos de 37 lavouras que foram novamente avaliadas. A coleta das amostras dessas lavouras foi feita em novembro de 2004, com amostragem em 40 lavouras em Ibirubá e em 37 em Santa Rosa, na camada de 0 a 10 cm de profundidade do solo. Esta camada de solo foi avaliada para contemplar os principais benefícios do SPD ao solo, mais intensos a partir da superfície. Nas amostras de solo, foram determinadas o pH, teor de matéria orgânica e de fósforo e potássio disponíveis, conforme metodologia utilizada pelos laboratórios da ROLAS, descrita em Tedesco et al., (1995). O rendimento de grãos não foi avaliado em função dos danos provocados pela estiagem ocorrida na safra de verão 2004/2005 no RS.

Apêndice 2: Avaliações feitas nos experimentos de coberturas e de preparos de solo na Estação Experimental Agronômica da UFRGS em Eldorado do Sul (Material e métodos)

Em Eldorado do Sul, na Estação Experimental Agronômica da UFRGS, foram avaliados dois experimentos: “Cobertura vegetal como alternativa de conservação do solo” (Experimento 1) e “Preparos de solo e cobertura vegetal como alternativa de conservação do solo” (Experimento 2) (Figura A2.1), instalados em 1983 e 1985, respectivamente. Os mesmos foram instalados pelo Prof. João Mielniczuk e atualmente são conduzidos por ele e pelo Prof. Cimélio Bayer, do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS, que foram disponibilizados para o presente trabalho. Nos experimentos foram avaliadas amostras de solo, coletadas para determinar os indicadores de fertilidade e agregação do solo, massa seca dos resíduos das culturas de inverno (2005) e massa seca e rendimento de grãos do milho (safra 2005/2006). Todos os tratamentos dos dois experimentos foram cultivados com milho para possibilitar, neste trabalho, a avaliação dos efeitos dos diferentes sistemas de cultivo, rotações de culturas e adubação nitrogenada no desenvolvimento e rendimento de grãos de milho, usado como indicador da fertilidade do solo. Assim, as avaliações foram feitas aos 22 e aos 20 anos da instalação dos experimentos de “Cobertura” e de “Preparos”, respectivamente.

O solo dos experimentos é classificado como Argissolo Vermelho distrófico (Pvd) pela Classificação Brasileira de Solos (EMBRAPA, 1999). Desde 1969 até a instalação dos experimentos a área foi cultivada no SC, por isso na implantação era alta a degradação das características físicas, químicas e biológicas do solo. Maiores detalhes da condução dos experimentos de “Coberturas” em Pillon (2000) e Diekow (2003) e de “Preparos” Lovato (2001), Conceição (2006), Zanatta (2006).

O delineamento do Experimento 1, “Cobertura Vegetal como Alternativa de Conservação do Solo” (Figura A2.1), segue o delineamento experimental blocos casualizados, os tratamentos estão distribuídos em parcelas sub-subdivididas com três repetições. As duas parcelas principais são uma descompactada e outra não descompactada (16 x 50 m), as dez rotações de culturas constituem as subparcelas (5 x 16 m), desde o início duas doses de

adubação nitrogenada (0 e 120 até 1994 e após 0 e 180 kg ha⁻¹ de N) constituem as sub-subparcelas (5 x 8 m) aplicadas no cultivo do milho. No cultivo de milho avaliado neste estudo, safra 2005/06, por não se observar mais efeito de descompactação, as subparcelas (5 x 16 m) foram consideradas parcelas e as sub-subparcelas, subparcelas (5 x 8 m). Estas foram sub-subdivididas (5 x 4 m) e nas sub-subparcelas 0 de N foram aplicadas doses 0 e 60 kg ha⁻¹ e nas 180 kg ha⁻¹ de N (antes de 1994, 120 kg ha⁻¹ de N) foram aplicadas doses de 120 e 180 kg ha⁻¹ de N. Na instalação do experimento, foi feita a adubação corretiva e a calagem, incorporadas ao solo com lavra a 20 cm de profundidade em toda a área. As espécies cultivadas eram manejadas de acordo com as suas particularidades, com o solo revolvido somente na linha no momento da semeadura e os resíduos mantidos na superfície do solo.

O delineamento experimental do Experimento 2, “Preparos de Solo e Cobertura Vegetal como Alternativa da Conservação do Solo” (Figura A2.1) é de blocos casualizados, com os tratamentos distribuídos em parcelas sub-subdivididas com três repetições. Os sistemas de preparo ou cultivo do solo constituem as parcelas principais (15 x 20 m), as três rotações de culturas as subparcelas (5 x 20 m) e desde o início duas doses de adubação nitrogenada (0 e 120 até 1994 e após 0 e 180 kg ha⁻¹ de N aplicadas no cultivo do milho constituem as sub-subparcelas (5 x 10 m). No cultivo de milho avaliado neste estudo, safra 2005/2006, as sub-subparcelas com as duas doses de N foram divididas em duas (5 x 5 m), nas que eram 0 de N foram aplicadas doses 0 e 60 kg ha⁻¹ e nas 180 kg ha⁻¹ de N (antes de 1994, 120 kg ha⁻¹ de N) foram aplicadas doses de 120 e 180 kg ha⁻¹ de N. Na instalação do experimento, em 1985, foi feita a adubação corretiva e a calagem (1 t ha⁻¹ calcário dolomítico), incorporadas ao solo com lavra a 20 cm de profundidade em toda a área. Foi feita calagem novamente no experimento em 1988, em 1992 e em 1996 (2 t ha⁻¹ calcário dolomítico). O manejo das culturas no inverno é feito com rolo faca, sendo depois preparado o solo para a semeadura do milho no caso do SC e do CM. O preparo e a incorporação do resíduo ao solo no SC é feita com uma aração e duas gradagens, no CM com escarificador de hastes e, no SPD o solo é revolvido somente na linha no momento da semeadura e os resíduos são mantidos na superfície do solo.

Experimento 2: Preparos e Cobertura Vegetal / Experimento 1: Cobertura Vegetal como Alternativas de Conservação do Solo

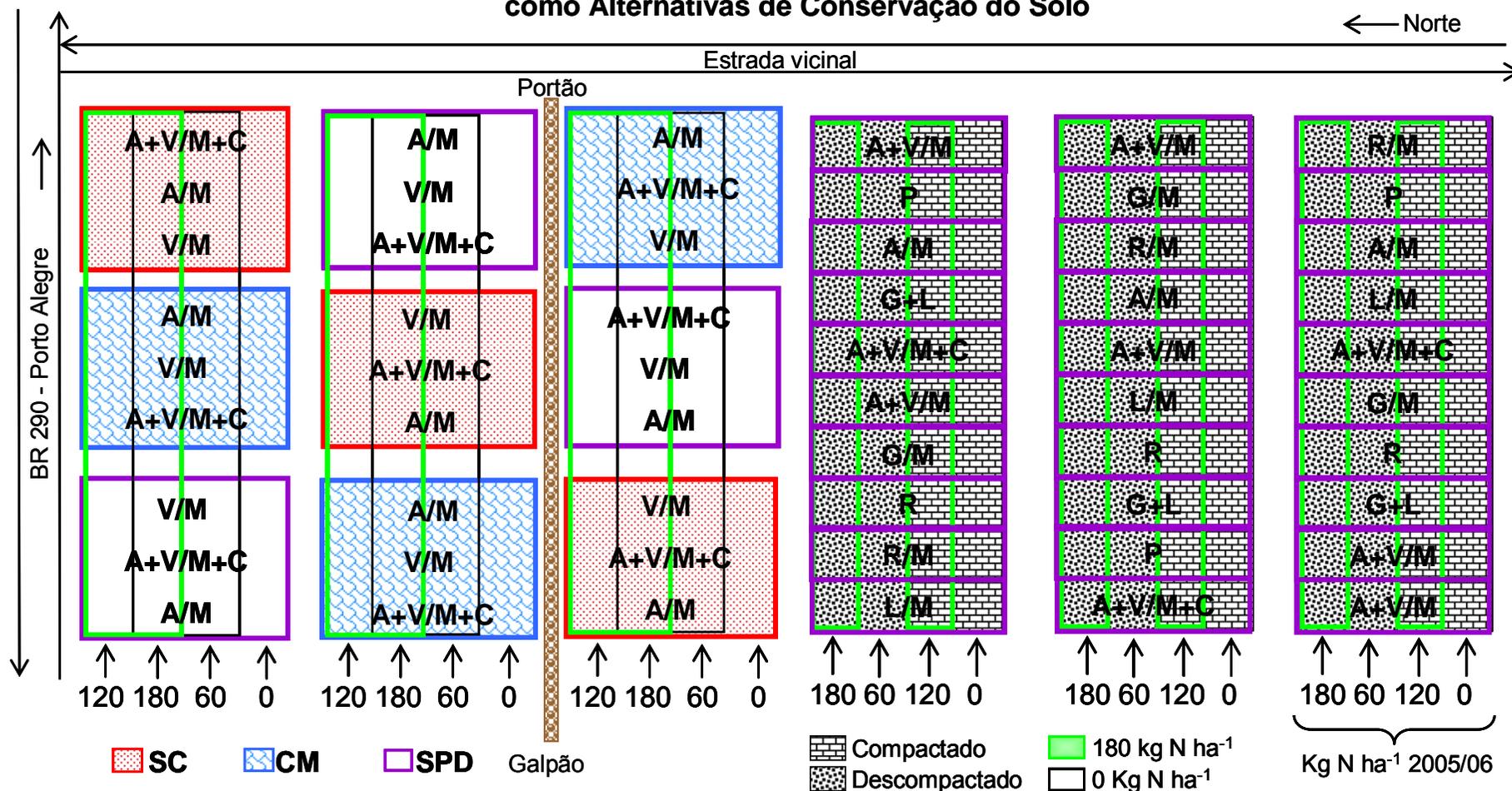


Figura A2.1. Representação esquemática da localização do Experimento 1 “Cobertura vegetal como alternativa de conservação do solo” e Experimento 2 “Preparos de solo e cobertura vegetal como alternativa de conservação do solo”, com a distribuição dos tratamentos avaliados, conduzidos na Estação Experimental Agronômica da UFRGS em Eldorado do Sul, em 2005/2006.

Nos dois experimentos, o milho, híbrido Pioneer 32R21, foi semeado na primeira quinzena de novembro, com adubação de base equivalente a 250 kg 00-20-20 (N-P₂O₅-K₂O) por hectare em todos os tratamentos, com 90 cm de espaçamento entre linhas entre 55 e 60.000 plantas por hectare. A adubação nitrogenada, aplicação de N mineral, na forma de uréia, em cobertura no milho foi feita no estágio fenológico V4, com 1/3 da dose, e no V6, com 2/3 da dose.

As amostras de solo foram coletadas na segunda quinzena de outubro de 2005, antecedendo o cultivo do milho. Para as determinações químicas foram coletadas amostras, compostas por duas subamostras, nas camadas de 0-10 e 0-20 cm, coletadas numa faixa transversal a linha de semeadura do milho cultivado na safra anterior. As amostras na camada 0-10 cm foram coletadas com espátula, cada subamostra correspondeu a uma fatia de solo de 5 cm de espessura e 10 cm de largura, e de 10-20 cm com trado calador (diâmetro de 2,5 cm), com quatro pontos por cada subamostra. Para determinação de N mineral (nitrato + amônio) foram coletados 20 mL de solo, colocados em frascos de vidro contendo 100 mL de solução 1M de KCl e imediatamente. Em seguida, os frascos foram transportados ao laboratório e mantidos a 4° C até a determinação. Também foram coletadas amostras de solo para a determinação da umidade. Para análise de agregados, foram coletadas com espátula duas amostras indeformadas de 10 cm x 10 cm na camada de 0-10 cm por parcela, para cada tratamento avaliado.

Nas amostras de solo, foram determinados o pH em água, o índice SMP e os teores de cálcio, de magnésio e de alumínio trocáveis, de matéria orgânica, de potássio e de fósforo disponíveis (Mehlich 1), de nitrogênio mineral e total e de umidade (Tedesco et al., 1995); o valor da acidez potencial (H+Al) foi estimado pelo índice SMP utilizando-se a equação de Kaminski et al. (2001) e a saturação por bases e por alumínio e CTC efetiva por cálculo.

A avaliação da distribuição de agregados estáveis em água foi feita pela metodologia proposta por Carpenedo & Mielniczuk (1990) e utilizada por Vezzani (2001). As amostras indeformadas de solo, na condição friável, foram manualmente desagregadas até toda a amostra passar em peneira de 9,51 mm de diâmetro. Os agregados foram secos à sombra por 72 horas. As amostras com 50 gramas de solo seco ao ar foram umedecidas por capilaridade em papel filtro. Após 16 horas de umedecimento, foram transferidas para tubos

plásticos de 1 L, com diâmetro de 9,5 cm e altura de 21 cm, contendo 0,5 L de água e colocadas em agitador rotativo por 2 minutos a 16 rpm. A seguir, as amostras foram transferidas para um conjunto de peneiras de 4,76; 2,00; 1,00; 0,50 e 0,25 mm de diâmetro de malha, acoplado em agitador vertical e inserido em balde, contendo água em nível suficiente para cobrir a metade da parede da peneira de 4,76 mm, quando na posição mais alta do processo de agitação. As amostras foram agitadas verticalmente por 15 minutos com 42 oscilações por minuto. Os agregados e as partículas de tamanho menor que 0,053 mm foram obtidos adicionando à água do balde, 25 mL de alúmen de potássio a 5%, a fim de precipitá-los. Após 16 horas de sedimentação estes foram coletados. Os agregados retidos em cada peneira e estes precipitados foram secos por 24 horas a 105° C. Após seco, o material de cada peneira foi pesado (Vezzani, 2001). Com os valores expressos em gramas, em cada peneira para cada amostra, foi calculada a percentagem de agregados para cada classe [% agregados = (massa de agregados na peneira “a” / somatório da massa dos agregados em todas as peneiras) *100].

A massa seca dos resíduos das culturas de inverno foi avaliada numa área de 0,5 x 0,5 m, com duas repetições por parcela. As amostras foram secas a 75° C em estufa até peso constante, depois foram pesadas e o valor transformado para hectare. Para avaliação da massa seca da cultura, foram coletadas cinco plantas inteiras de milho por parcela. As amostras foram secas a 75° C em estufa até peso constante, depois foram pesadas e o valor transformado para hectare. A produtividade de grãos foi avaliada em área de 5,4 m² e 7,2 m² por tratamento nos experimentos um e dois, respectivamente. A umidade dos grãos foi de 14%, mas os dados apresentados neste trabalho não tiveram a umidade corrigida.

Todas as determinações foram feitas em todos os tratamentos dos dois experimentos, exceto a agregação, que foi feita somente nos tratamentos: SC: A/M; SC: V/M; SC: A+V/M+C; SPD: A/M; SPD: V/M; SPD: A+V/M+C; SPD: P; R, sem adubação nitrogenada.

Apêndice 3. Avaliação da fertilidade do solo, da concentração de nutrientes no tecido de plantas e do rendimento de grãos da soja em lavouras conduzidas no SPD no Planalto Médio do RS (Material e métodos)

As seis lavouras utilizadas para avaliação da fertilidade neste estudo foram selecionadas pela alta variabilidade dos seus indicadores químicos para bem representar às condições de campo, das lavouras cultivadas no SPD há pelo menos cinco anos (consolidado). Elas foram selecionadas na região produtora de grãos, isto é, no Planalto do RS, onde predomina o solo Latossolo Vermelho distrófico (LVd), em três municípios: lavouras 1, 2 e 3 em Cruz Alta; 4 em Não-Me-Toque; 5 e 6 em Ibirubá. A área das lavouras, cultivadas com soja (*Glycine max*), variou de 5 a 20 hectares. Os tratos culturais e a adubação (na linha de semeadura) foram feitos conforme as Indicações Técnicas da Soja RS/SC (2001) (Tabela A3.1). Embora a soja tenha sido manejada de modo semelhante, era diferente a amplitude dos indicadores de fertilidade (Tabela A4.3.) e o histórico de uso das lavouras (Tabela A3.2.) tradicional sobre campo natural, é relativamente recente, especialmente a partir da década de 1990, enquanto em Ibirubá e em Não-Me-Toque, a agricultura é praticada desde a década de 1960 no SC e a partir do início da década de 1990 no SPD, por isso nestes, a fertilidade do solo foi corrigida há mais tempo.

Foram avaliados 20 locais (1,0 x 1,2 m) em cada lavoura, exceto na lavoura 3 que foram 14, distribuídos de modo a contemplar a heterogeneidade do solo. Em cada local foi avaliado a concentração de nutrientes no tecido vegetal e o rendimento de grãos da soja e os indicadores de fertilidade do solo. O tecido vegetal foi coletado no estágio de pleno florescimento, coletando-se, manualmente, 30 folhas no terço superior das plantas em cada local. Os locais dentro de cada lavoura foram selecionados para contemplar as diferenças visuais observadas no desenvolvimento das plantas. No momento da coleta do tecido, os locais foram demarcados (identificados) para que os mesmos fossem encontrados e avaliados após a maturação da soja. Após o final do ciclo da soja (safra 2001/02) foi avaliado o rendimento de grãos nas plantas cortadas manualmente com foice nos locais antes identificados, sendo processadas em trilhadeira mecânica estacionária. O solo foi amostrado o solo nesses mesmos locais, nas camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm de profundidade. Cada amostra foi

composta por três subamostras (de uma fatia de solo de 5 cm de espessura por 40 cm de largura, centralizada na linha de semeadura), que foram coletadas com pá-de-corte.

As plantas foram trilhadas, os grãos pesados e determinada a sua umidade, que foi corrigida para 13% para o cálculo do rendimento. As amostras de tecido vegetal foram secas em estufa na temperatura de 60 °C, moídas, e digeridas, a seco (EMBRAPA, 1997). Foi utilizada, como solução digestora de HCl 1 mol L⁻¹ substituindo HNO₃. Os teores de fósforo e potássio foram determinados por colorimetria e fotometria de chama, respectivamente; o cálcio e o magnésio, utilizando solução de Sr 0,3 % substituindo a solução de La 0,1 %, foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica. Nas amostras de solo, foram determinados o pH em água, o índice SMP, os teores de cálcio, de magnésio e de alumínio trocáveis, de matéria orgânica, de potássio e de fósforo disponíveis (Mehlich 1) (Tedesco et al., 1995); o valor da acidez potencial (H+Al) foi estimado pelo índice SMP utilizando-se a equação de Kaminski et al. (2001) e a saturação por bases e por alumínio por cálculo.

Os valores dos indicadores de fertilidade na camada de 0-20 cm correspondem às médias das amostras de 0-10 e 10-20 cm, em cada local. Para análise conjunta dos resultados das seis lavouras foi calculado o rendimento relativo de grãos de soja atribuindo o valor de 100 ao rendimento máximo em cada lavoura, e os demais valores proporcionais a esse. Foi descartado um local dos avaliados em cada lavoura, aquele com resultados mais incoerentes entre os indicadores de fertilidade e o rendimento de grãos.

Tabela A3.1. Amplitude dos valores de indicadores de fertilidade do solo nas lavouras avaliadas no Planalto Médio do RS (Nicolodi, 2003)

Lavouras	Amplitude dos valores e teores dos indicadores de fertilidade do solo						
	Argila	pH	Alumínio	Fósforo	Potássio	Matéria orgânica	Sat. bases
	0-20 cm	0-10 cm					
	%		cmol _c dm ⁻³	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³	%	%
1. Cruz Alta	34 – 46	4,4 – 5,4	0,1 – 1,1	5,1 – 30,4	67 – 204	2,0 - 3,4	24 – 75
2. Cruz Alta	34 – 35	4,8 – 5,6	0,1 – 1,1	3,0 – 15,6	50 – 176	2,1 - 2,9	40 – 68
3. Cruz Alta	40 – 44	4,3 – 5,2	0,2 – 2,0	2,3 – 28,0	13 – 156	2,4 - 2,7	19 – 63
4. Não-Me-Toque	70 – 75	5,0 – 6,2	0,0 – 0,3	6,7 – 36,6	35 – 290	3,6 - 3,9	57 – 81
5. Ibirubá	58 – 65	5,1 – 6,2	0,0 – 0,6	8,2 – 32,3	65 - 158	2,5 - 3,4	62 – 85
6. Ibirubá	62 – 64	4,9 – 6,6	0,0 – 0,2	3,2 – 25,7	55 - 231	3,3 - 3,8	50 – 91
Amplitude total	34 – 75	4,3 – 6,6	0,0 – 2,0	2,3 – 36,6	13 – 290	2,0 - 3,9	19 – 91

Tabela A3.2. Tempo de cultivo do solo no SPD, amplitude e média do rendimento de grãos de soja (safra 2001/02) e última adubação e calagem nas lavouras avaliadas no Planalto Médio (Nicolodi, 2003)

Lavouras	Tempo de SPD anos	Rendimento de grãos		Adubação (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O) kg ha ⁻¹	Última aplicação de calcário ano, t ha ⁻¹ e modo
		Amplitude ----- t ha ⁻¹ -----	Média		
1. Cruz Alta	5	1,8 – 6,0	2,94	280 (02-20-30)	1998, 4, incorporado
2. Cruz Alta	9	2,7 – 4,2	2,48	250 (00-20-30)	1998, 2,7, superficial
3. Cruz Alta	8	0,3 – 3,4	2,10	280 (00-12-30)	1993, 4, incorporado
4. Não-Me-Toque	6	2,3 – 4,4	3,00	200 (00-20-30)	1995, 3, incorporado
5. Ibirubá	5	2,8 – 4,2	3,06	200 (00-20-30)	2000, 2,5, superficial
6. Ibirubá	9	2,1 – 3,0	3,00	200 (00-20-30)	1999, 2,3, superficial

Tabela A3.3. Histórico de cultivo da safra de verão 1998/99 a de inverno de 2001 das lavouras avaliadas no Planalto Médio (Nicolodi, 2003)

Lavouras	Cultura	Verão 1998/99		Cultura	Inverno 1999	
		Adubação ¹ kg ha ⁻¹	Rend. grãos t ha ⁻¹		Adubação ¹ kg ha ⁻¹	Rend. grãos t ha ⁻¹
1. Cruz Alta	soja	250 02-20-30	1,62*	aveia preta	200 P natural	-
2. Cruz Alta	milho	200 00-20-30	2,05*	trigo	250 08-18-28 + 200 uréia	1,64
3. Cruz Alta	milho	175 02-20-20 300	1,56*	aveia + azevém	-	-
4. Não-Me-Toque	milho	05-25-25 + 100 uréia	5,10	cevada	250 05-25-25	2,28
5. Ibirubá	soja	200 02-20-30	2,70	trigo	200 05-20-30	1,98
6. Ibirubá	soja	200 02-20-30	2,70	trigo	200 05-20-30	2,10
		Verão 1999/2000				
1. Cruz Alta	soja	250 02-20-30	1,80*	trigo	200 05-20-30	2,10
2. Cruz Alta	soja	200 00-20-30	1,68*	aveia + azevém	-	-
3. Cruz Alta	soja	100 KCl	1,50*	aveia + azevém	-	-
4. Não-Me-Toque	soja	200 00-20-30	2,40*	trigo	230 05-25-25	2,10
5. Ibirubá	soja	200 02-20-30	2,10*	cevada	250 05-20-30	1,20
6. Ibirubá	soja	200 02-20-30	2,88*	trigo	200 05-20-30	1,80
		Verão 2000/2001				
1. Cruz Alta	soja	250 02-20-30	3,12	trigo	200 05-20-30	1,80
2. Cruz Alta	soja	200 00-20-30	2,52	aveia + azevém	-	-
3. Cruz Alta	soja	200 00-20-30	1,98	aveia + azevém	-	-
4. Não-Me-Toque	soja	200 00-20-30	3,48	trigo	230 08-18-28	2,88
5. Ibirubá	soja	220 02-20-30	3,30	trigo	200 05-20-30	1,80
6. Ibirubá	soja	190 02-20-30	3,18	cevada	200 05-20-30	1,92

¹N-P₂O₅-K₂O ; * Prejudicado por precipitação pluviométrica abaixo da normal.

Apêndice 4: Avaliações feitas no experimento de uso e manejo e conservação do solo na COTRISA em Santo Ângelo (Material e métodos)

Em Santo Ângelo, no Centro de Atividades Agrícolas e Florestais da Cooperativa Triticola de Santo Ângelo – COTRISA, foi avaliado o experimento “Uso e manejo e conservação do solo” (Figura A4.1.), instalado em 1979 por Amando Dalla Rosa e conduzido por ele, João Becker e Giordani Desordi. No experimento, foram avaliadas amostras de solo coletadas em outubro de 2004, para determinar os indicadores de fertilidade do solo, e o rendimento de grãos de soja (safra 2004/2005), aos 25 anos da instalação do experimento. Antes da instalação do experimento, a área foi cultivada com trigo/soja por 15 anos e estava em avançado processo de degradação física. O solo dos experimentos é classificado como Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) pela Classificação Brasileira de Solos (EMBRAPA, 1999). Maiores detalhes da condução do experimento em Dalla Rosa (1981); Merten (1988) e Conceição (2006).

Inicialmente, o experimento contemplava quatro métodos de preparo do solo (SC com arado de discos e duas gradagens; SC com arado “pé-de-pato” e uma gradagem, CM: com escarificador e SPD) e cultivo contínuo em trigo/soja. No SPD eram avaliadas sete rotações de culturas. Todos esses tratamentos foram conduzidos com e sem a descompactação mecânica do solo. No decorrer dos anos foram feitas algumas modificações no experimento. em 1985, foram eliminados o tratamento de compactação e o SC com “pé-de-pato” e introduzido o cultivo do milho e os tratamentos com nitrogênio. Em 1999 todo o experimento passou a ser cultivado com uma única rotação de culturas, mantendo os sistemas de preparo e a adubação nitrogenada (Tabela A4.1).

O delineamento do experimento segue o de blocos casualizados, com quatro repetições. Os sistemas de preparo de solo constituem as parcelas principais (5 x 10 m). Nas subparcelas estão as culturas (rotação T/S e A/M), nas subsubparcelas as doses com e sem nitrogênio. No SPD tem-se também três rotações de culturas e três leguminosas antecedendo a cultura do milho. Foi adicionado calcário na implantação do experimento (4,7 t ha⁻¹), em 1985 (2 t ha⁻¹ + 1 t ha⁻¹ de gesso agrícola), e em 1992 (4 t ha⁻¹). A adubação das espécies cultivadas é feita conforme as recomendações da Comissão de Química e Fertilidade do Solo (CQFS RS/SC, 2004).

Figura A4.1. Representação esquemática dos tratamentos no experimento de sistemas de cultivo de 1999 a 2004 conduzido na COTRISA em Santo Ângelo (em negrito os tratamentos avaliados)

C/N	S/N	C/N	S/N	C/N	S/N
SPD rotação	SPD rotação	SPD rotação	SPD rotação	SC T/S	SC T/S
SPD rotação	SPD rotação	SPD rotação	SPD rotação	SC A/M	SC A/M
SPD rotação	SPD rotação	CM T/S	CM T/S	SPD T/S	SPD T/S
SPD rotação	SPD rotação	CM A/M	CM A/M	SPD A/M	SPD A/M
Terraço					
SPD rotação	SPD rotação	SPD rotação	SPD rotação	SC T/S	SC T/S
SPD rotação	SPD rotação	SPD rotação	SPD rotação	SC A/M	SC A/M
SPD rotação	SPD rotação	CM T/S	CM T/S	SPD T/S	SPD T/S
SPD rotação	SPD rotação	CM A/M	CM A/M	SPD A/M	SPD A/M

Tabela A4.1. Resumo da seqüência de culturas utilizadas ao longo da condução do experimento na COTRISA (Conceição, 2006)

Período	Sistemas de cultivo			
	SC		SPD	
1979-1985		T/S	T/S	Rotação ¹
1986-1999	T/S	A/M	T/S	Rotação
1999/2000		T/S		
2000/2001		T/M		
2001/2002		A/S		
2002/2003		N/M		
2003/2004		T/S		
2004		N		

¹SPD - rotação de culturas: T (1979), S (1979/1980), Tç (1980), M (1980/1981), Cz (1981), Sg (1981/1982), T (1982), S (1982/1983), Tç (1983), M (1983/1984), T (1985), S (1985/1986), Tç (1986), S (1986/1987), Tç (1987), M (1987/1988), Cz (1988), S (1988/1989), Cz (1989), S (1989/1990), T (1990), S (1990/1991), A+Tv (1991), M (1991/1992), Cz (1992), S (1992/1993), T (1993), S (1993/1994), A+Tv (1994), M (1994/1995), Cz (1995), S (1995/1996), T (1996), S (1996/1997), A+Tv (1997), M (1997,1998), Cz (1998), S (1998/1999).

Para este trabalho foram amostradas o solo nas parcelas dos tratamentos destacados em negrito na Figura A6.1. As amostras de solo, nas camadas de 0-2,5; 2,5-5,0; 5,0-7,5; 7,5-10,0 e 10-20 cm, foram coletadas em outubro de 2004. As amostras foram coletadas com pá-de-corte, compostas por três subamostras, de 5 cm de espessura por 20 de largura centralizadas na linha de semeadura da cultura de inverno. Nas amostras de solo, foram determinados o pH em água, o índice SMP, os teores de cálcio, de magnésio e de alumínio trocáveis, de matéria orgânica, de potássio e de fósforo disponíveis (Mehlich 1) (Tedesco et al., 1995); o valor da acidez potencial (H+Al) foi estimado pelo índice SMP utilizando-se a equação de Kaminski et al. (2001) e a saturação por bases e por alumínio e CTC efetiva por cálculo.

Apêndice 5: Avaliações feitas no experimento de “Sistemas de preparo de solo” na EMBRAPA Trigo, em Passo Fundo (Material e Métodos)

Em Passo Fundo, na EMBRAPA – Trigo foi avaliado um experimento: “Alternativas de diferentes sistemas de preparo do solo no rendimento da cevada”, instalado em 1983 e conduzido pelos pesquisadores Rainoldo Alberto Kochhann e José Eloir Denardin. No experimento foram avaliadas amostras de solo coletadas em outubro, 2004, para determinar os indicadores de fertilidade e rendimento de grãos de soja (safra 2004/2005), aos 21 anos da instalação do experimento.

O solo dos experimentos é classificado como Latossolo Vermelho distrófico (LVd) pela Classificação Brasileira de Solos (EMBRAPA, 1999). O delineamento do experimento segue o de blocos casualizados, com quatro repetições (Figura A5.1). Os sistemas de preparo de solo (SC: uma aração e duas gradagens antecedendo a implantação das culturas; CM: escarificação e uma gradagem; SPD: revolvimento somente na linha no momento da semeadura e manutenção dos resíduos na superfície do solo) constituem as parcelas principais (5 x 10 m), e as rotações de culturas alternadas no tempo (Tabela A5.1) as subparcelas. Em 1989 foram incorporadas 7 t ha⁻¹ de calcário em todas as parcelas. A adubação de cada espécie cultivada no experimento é feita na linha de semeadura conforme as recomendações da Comissão de Química e Fertilidade do Solo (CQFS RS/SC, 2004).

As amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0-5; 5-10 e 10-20 cm, com pá-de-corte, compostas por três subamostras, de 5 cm de espessura por 20 de largura centralizadas na linha de semeadura da cultura de inverno. Nas amostras de solo, foram determinados o pH em água, o índice SMP, os teores de cálcio, de magnésio e de alumínio trocáveis, de matéria orgânica e de potássio e de fósforo disponíveis (Mehlich 1) (Tedesco et al., 1995); o valor da acidez potencial (H+Al) foi estimado pelo índice SMP utilizando-se a equação de Kaminski et al. (2001) e a saturação por bases e por alumínio e CTC efetiva por cálculo. A produtividade de grãos da soja é avaliada numa área de 12,8 m² por tratamento, determinada a umidade dos grãos e corrigida para 13% e a área para hectare.

Figura A5.1. Representação esquemática dos tratamentos com rotação S/Cv/S/V/Sg/Ab alternada no experimento de sistemas de cultivo, conduzido na EMBRAPA Trigo em Passo Fundo

Bloco I			Bloco II			Bloco III			
SC11	SPD31	CM21	SPD31	CM21	SC11	SPD31	SC12	CM23	SPD34
SPD32	CM22	SC12	CM22	SC12	SPD32	SC11	SPD32	SC13	CM24
CM23	SC13	SPD33	SC13	SPD33	CM23	CM21	CM22	SPD33	SC14
SPD34	CM24	SC14	SPD34	CM24	SC14				

Tabela A5.1. Espécies cultivadas na rotação de culturas nos três sistemas de cultivo no experimento na EMBRAPA Trigo em Passo Fundo

Safr	Safr / ano	Espécies cultivadas ¹		
		Bloco I	Bloco II	Bloco III
Inverno	1990	V	Ap	Cv
Verão	1990/1991	M	S	S
Inverno	1991	Ap	Cv	V
Verão	1991/1992	S	S	M
Inverno	1992	Cv	V	Ap
Verão	1992/1993	S	M	S
Inverno	1993	V	Ap	Cv
Verão	1993/1994	M	S	S
Inverno	1994	Ab	Cv	V
Verão	1994/1995	S	S	S
Inverno	1995	Cv	V	Ab
Verão	1995/1996	S	Sg	S
Inverno	1996	V	Ab	Cv
Verão	1996/1997	Sg	S	S
Inverno	1997	Ab	Cv	V
Verão	1997/1998	S	S	Sg
Inverno	1998	Cv	V	Ab
Verão	1998/1999	S	Sg	S
Inverno	1999	V	Ab	Cv
Verão	1999/2000	Sg	S	S
Inverno	2000	Ab	Cv	V
Verão	2000/2001	S	S	Sg
Inverno	2001	Cv	V	Ab
Verão	2001/2002	S	Sg	S
Inverno	2002	V	Ab	Cv
Verão	2002/2003	Sg	S	S
Inverno	2003	Ab	Cv	V
Verão	2003/2004	S	S	Sg
Inverno	2004	Cv	V	Ab
Verão	2004/2005	S	Sg	S

¹S: soja; M: milho; Cv: cevada; Ap: aveia preta; Ab: aveia branca; Sg: sorgo; V: vica/ervilhaca.

Apêndice 6. Valores do rendimento de grãos e dos indicadores de fertilidade do solo relativos (%) ao SC A/M (= 100%) avaliados na safra 2005/06 em experimentos conduzidos há mais de 20 anos em Eldorado do Sul (PVd: 0-10 cm)

Históricos de cultivo	Rend.	pH água	P disponíveis	K	Al¹ trocáveis	Ca	Mg	CTC efetiva	MO	N total	V	m¹	Umidade
Adubação nitrogenada no milho: 0 kg de N por hectare													
SC A/M = 100%	100	100	4	100	4	100	100	100	100	100	100	20	100
SC V/M	208	87	329	83	329	75	76	93	111	112	73	360	112
SC A+V/M+C	162	89	169	98	169	81	82	92	118	125	84	186	112
SPD A/M	168	101	0	106	0	113	116	113	114	130	104	0	102
SPD V/M	349	89	164	91	164	86	104	101	139	148	80	166	113
SPD A+V/M+C	342	90	129	94	129	104	113	113	158	159	86	116	124
Adubação nitrogenada no milho: 180 kg de N por hectare													
SC A/M = 100%	100	100	25	100	25	100	100	100	100	100	100	25	100
SC V/M	121	88	188	79	188	69	79	97	108	107	64	194	102
SC A+V/M+C	111	93	93	98	93	83	93	98	111	111	87	95	109
SPD A/M	165	99	32	77	32	102	122	106	125	121	102	31	110
SPD V/M	164	88	168	95	168	71	99	103	146	148	64	163	116
SPD A+V/M+C	136	87	139	78	139	88	107	109	156	160	69	128	127
Tratamentos com e sem adubação nitrogenada no milho: 0 e 180 kg de N por hectare													
	Rend.	Rend./4	P disponível	MO	Mg trocável	CTC efetiva	N total	Umidade					
SC A/M: 0 = 100%	100	25	100	100	100	100	100	100					
SC V/M: 0	208	52	85	111	76	93	112	112					
SC A+V/M+C: 0	162	40	71	118	82	92	125	112					
SPD A/M: 0	168	42	291	114	116	113	130	102					
SPD V/M: 0	349	87	142	139	104	101	148	113					
SPD A+V/M+C: 0	342	85	139	158	113	113	159	124					
SC A/M: 180	416	104	89	104	80	88	108	101					
SC V/M: 180	505	126	66	113	63	85	116	103					
SC A+V/M+C: 180	463	116	75	116	75	86	120	111					
SPD A/M: 180	686	172	174	130	98	93	131	111					
SPD V/M: 180	685	171	122	152	79	90	161	117					
SPD A+V/M+C: 180	565	141	159	162	86	96	174	129					

¹Nos tratamentos sem N: Al/25 e m/5, nos com 180 kg de N Al/4 e m/4.

Apêndice 7. Resultados dos experimentos de Eldorado do Sul, Passo Fundo e Santo Ângelo utilizados para testar capacidade da técnica de normalização para expressar níveis da fertilidade

Foram utilizados os resultados dos indicadores da fertilidade do solo e rendimento de grãos das culturas dos experimentos conduzidos em Eldorado do Sul (Apêndice 2), em Passo Fundo (Apêndice 5) e em Santo Ângelo (Apêndice 4), avaliados em diferentes épocas, independentemente do sistema de cultivo, da rotação de culturas ou do tipo de adubação, para testar a capacidade da técnica da normalização em expressar diferentes níveis de fertilidade do solo.

Os resultados reais das avaliações feitas em Eldorado do Sul (Tabela A7.1.), em Passo Fundo (Tabela A7.2.) e em Santo Ângelo (Tabela A7.3.) foram normalizados, ou seja, aos valores mínimo e máximo reais de cada indicador, em cada local, foram atribuídos valores zero e 100, respectivamente. A fórmula para normalização dos resultados foi: X (valor normalizado entre zero e 100) = $((\text{valor real no ponto} - \text{valor real mínimo}) \times 100) / (\text{valor real máximo} - \text{valor real mínimo})$. Em alguns testes, para o rendimento de grãos, foram utilizados calculados e utilizados os valores relativos (mínimo possível = zero e o máximo obtido em cada local como 100%) ao invés dos absolutos. Também os indicadores do solo foram normalizados considerando a amplitude dos indicadores normalmente encontrada nos solos; os valores mínimos como zero e os valores máximos como 100.

Tabela A7.1. Valores e teores dos indicadores de fertilidade do solo, na camada de 0-10 cm e do rendimento de grãos de milho avaliados desde o início da condução dos experimentos de “Cobertura” (1983) e de “Preparos” (1985) do solo até 2006 em Eldorado do Sul, utilizados para avaliação da técnica da normalização para expressar níveis de fertilidade dos solos

Ano*	Sistema de cultivo	Rend. t ha ⁻¹	pH	P -----mg dm ⁻³ -----	K cmol _c dm ⁻³	Al	MO -----%-----	V	m
1985 ¹	SC A/M c/N	4,7	5,3	9	79		2,2		
	SC A/M s/N	3,4	5,3	9	79		2,2		
	SC A+V/M+C c/N	2,9	5,3	9	79		2,2		
	SC A+V/M+C s/N	2,2	5,3	9	79		2,2		
	SPD A/M c/N	4,6	5,3	9	79		2,2		
	SPD A/M s/N	2,3	5,3	9	79		2,2		
	SPD A+V/M+C c/N	2,9	5,3	9	79		2,2		
	SPD A+V/M+C s/N	1,9	5,3	9	79		2,2		
1986 ²	SPD A+V/M+C s/N	3,3					2,8		
	SPD G/M s/N	3,6					3,3		
	SPD R/M s/N	0,9					2,2		

1987 ³	SPD A+V/M+C s/N	2,0	5,4	34	173		3,4		
	P s/N	6,1	5,6	28	171		3,2		
1988 ⁴	SPD A+V/M+C s/N	4,7	5,5	64	247		2,5	53	
	SPD G/M s/N	6,2	5,4	64	241		3,1	54	
	SPD R/M s/N	2,3	5,3	48	167		2,0	52	
	P s/N	2,5	5,6				2,3	58	
	R s/N	1,9	5,3				1,9	51	
1990 ⁵	SC A/M s/N	2,9	5,1	82	200		2,9		
	SC A+V/M+C s/N	3,9	5,1	66	135		2,9		
	SPD A/M s/N	2,4	5,0	100	161		3,3		
	SPD A+V/M+C s/N	3,2	5,0	130	135		3,7		
1991 ⁶	SPD A+V/M+C s/N	3,8					2,6		
	SPD G/M s/N	4,6					3,3		
	SPD R/M s/N	2,4					2,3		
1993 ⁷	SPD A+V/M+C s/N	6,4	5,1		112		2,7	47	
	SPD G/M s/N	6,2	5,1		201		3,4	54	
	SPD R/M s/N	2,2	5,3		160		2,0	55	
	P s/N	1,3	5,6		126	0,2	2,6	58	6
	R s/N	2,0	5,4		110	0,1	1,9	51	3
1994 ⁸	SPD A+V/M+C c/N	6,2				0,4			11
	SPD A+V/M+C s/N	3,3					2,5		
	SPD R/M s/N	2,0					1,9		
	SC A/M s/N	1,7					2,7		
	SC A+V/M+C s/N	4,4					3,1		
	SPD A/M s/N	2,1					3,2		
	SPD A+V/M+C s/N	3,8					4,4		
1997 ⁹	SPD A+V/M+C s/N	6,8	5,1	72	73	1,2	2,4		
	SPD G/M s/N	6,8	5,3	74	61	0,4	3,0		
	SC A/M s/N	1,5	5,7	75	81	0,0			
	SC A+V/M+C s/N	6,0	5,1	61	45	0,9			
	SPD A/M s/N	2,0	5,8	62	90	0,2			
	SPD A+V/M+C s/N	4,9	5,5	70	82	0,5			
1998 ¹⁰	SC A/M c/N	5,2	5,2	29	172	0,3	2,1	60	3,2
	SC A/M s/N	1,3	5,6	32	202	0,1	1,7	65	0,8
	SC A+V/M+C c/N	11,5	5,2	27	153	0,6	2,2	51	9,2
	SC A+V/M+C s/N	5,2	5,2	30	262	0,3	2,1	58	4,2
	SPD A/M c/N	9,9	5,6	40	177	0,2	2,4	63	3,5
	SPD A/M s/N	2,0	5,6	66	174	0,1	2,2	63	2,5
	SPD A+V/M+C c/N	9,8	5,4	52	167	0,3	2,9	58	4,4
	SPD A+V/M+C s/N	5,9	5,6	65	199	0,2	2,7	59	3,1
1999 ¹¹	SPD A+V/M+C s/N	5,7	5,0				2,7		
	SPD R/M s/N	2,6	5,4				2,2		
2000 ¹²	SPD A+V/M+C s/N	4,1	4,6	33	138	0,4	2,5	52	4
	SPD G/M s/N	7,8	4,8	36	229	0,2	3,0	64	1,6
	SPD R/M s/N	2,6	5,0	41	163	0,1	1,8	64	1,3
	SC A/M c/N	10,5					2,3		
	SC A/M s/N	1,6					1,8		
	SPD A/M c/N	10,5					2,5		
	SPD A+V/M+C c/N	11,4					3,0		
2002 ¹³	SPD A+V/M+C s/N	4,0	4,7	45,7	262	1,6	2,6	29	26
	SPD G/M s/N	4,4	4,6	46,7	231	1,1	2,9	36	17
	SPD R/M c/N	7,4	4,6	34,1	220	2,1	2,2	27	35
	SPD R/M s/N	1,3	4,9	58,7	236	1,0	2,0	43	15
2003 ¹⁴	SC A/M c/N	9,8	4,9	31,3		0,3	2,1		
	SC A/M s/N	2,9	4,9	21,3		0,2	2,0		
	SC A+V/M+C c/N	10,4	4,8	14,6		0,6	2,5		
	SC A+V/M+C s/N	4,6	4,5	18,1		0,4			
	SPD A/M c/N	9,2	5,1	44,6		0,3	2,9		
	SPD A/M s/N	2,0	5,3	63,9		0,2	2,5		
	SPD A+V/M+C c/N	11,0	4,5	49,2		0,6	3,6		
SPD A+V/M+C s/N	6,8	4,3	43,5		0,3	3,3			

2005	SPD A+V/M+C c/N	8,3	4,5	18,5	207	1,2	2,8	27	27
	SPD A+V/M+C s/N	4,3	4,8	21,6	214	0,9	2,6	38	21
	SPD G/M c/N	8,8	4,6	32,6	241	0,8	4,5	39	13
	SPD G/M s/N	9,2	4,6	38,1	217	0,7	4,4	42	11
	SPD R/M c/N	10,0	5,0	24,4	241	0,5	2,3	47	11
	SPD R/M s/N	3,7	5,2	39,5	235	0,4	1,9	49	9
	P s/N	3,6	5,6	7,7	194	0,0	2,7	57	1
	R s/N	3,0	4,9	9,3	128	0,9	1,8	40	23
	SC A/M c/N	5,7	5,4	15	176	0,2	1,8	57	4
	SC A/M s/N	1,4	5,8	17	171	0,0	1,7	64	0
	SC A+V/M+C c/N	6,4	5,1	13	172	0,6	2,0	49	14
	SC A+V/M+C s/N	2,2	5,2	12	168	0,4	2,1	54	9
	SPD A/M c/N	9,4	5,4	30	136	0,2	2,3	58	4
	SPD A/M s/N	2,3	5,8	49	181	0,0	2,0	67	0
	SPD A+V/M+C c/N	7,8	4,7	27	138	0,9	2,8	39	18
	SPD A+V/M+C s/N	4,7	5,2	24	160	0,3	2,7	55	6

*Valores adaptados de: ¹Freitas (1988); ²Teixeira (1988); ³Cattelan (1989); ⁴Testa (1989);

⁵Bayer (1992); ⁶Pavinato (1993); ⁷Burle (1995); ⁸Bayer (1996); ⁹Rheinheimer (2000); ¹⁰Carballo (2004); ¹¹Pillon (2000); ¹²Conceição (2002); ¹³Vieira (2007); ¹⁴Zanatta (2006).

Tabela A7.2. Valores e teores dos indicadores de fertilidade do solo, na camada de 0-20 cm, e do rendimento de grãos de soja avaliados no experimento desde 1985 até 2004 em Passo Fundo, utilizados para avaliação da técnica da normalização para expressar níveis de fertilidade dos solos (rotação S/Cv/S/V/Sg/Ab alternada nos três sistemas de cultivo)

Ano*	Sistema de cultivo	Rend. t ha ⁻¹	pH	P	K	Al	MO	V	m
				----mg dm ⁻³ ----	cmol _c dm ⁻³	-----%-----			
1985	SC	1,9	5,2	18	82	0,5	3,8		
	CM	1,9	5,2	22	82	0,5	3,6		
	SPD	1,7	5,1	17	75	0,6	3,6		
1986	SC	1,8	5,6	22	96	0,2	3,0		
	CM	1,8	5,6	25	96	0,3	3,0		
	SPD	1,8	5,6	19	89	0,3	3,0		
1987	SC	1,9	5,2	30	131	0,6	3,6		
	CM	1,8	5,2	32	132	0,6	3,4		
	SPD	1,8	5,1	29	125	0,7	3,2		
1988	SC	1,4	5,1	29	131	0,9	3,5		
	CM	1,3	5,3	33	146	0,5	3,6		
	SPD	1,3	5,2	29	128	0,5	3,3		
1989	SC	2,7	5,1	29	143	0,8	3,5		
	CM	2,7	5,2	32	148	0,6	3,5		
	SPD	2,6	5,2	28	138	0,6	3,3		
1990	SC	2,1	5,8	20	167	0,0	4,4		
	CM	1,9	5,8	20	161	0,0	4,5		
	SPD	2,0	5,8	22	166	0,0	4,4		
1991	SC	1,8	5,8	20	157	0,0	4,2		
	CM	1,7	5,8	21	154	0,0	4,4		
	SPD	1,4	5,7	21	137	0,1	4,4		
1992	SC	3,1	5,6	22	170	0,1	3,1		
	CM	3,1	5,7	21	176	0,1	3,3		
	SPD	2,9	5,6	24	160	0,1	3,2		
1993	SC	4,2	6,2	21	145	0,0	2,4		
	CM	4,2	6,1	25	145	0,0	2,5		
	SPD	4,1	6,0	23	149	0,0	2,5		
1994	SC	3,2	5,9	23	172	0,0	2,6		
	CM	3,3	5,8	27	160	0,0	2,6		
	SPD	3,5	5,7	27	163	0,1	2,5		
1995	SC	3,4	5,8	22	150	0,0	2,8		

	CM	3,1	5,8	24	137	0,0	2,9		
	SPD	3,3	5,8	27	126	0,1	2,8		
1996	SC	2,1	5,7	15	123	0,1	2,8		
	CM	2,2	5,9	22	123	0,0	3,4		
	SPD	2,4	5,8	24	142	0,1	2,8		
1998	SC	2,5	5,7	15	163	0,1	2,8	73	2
	CM	2,6	5,8	27	176	0,1	2,6	74	1
	SPD	2,4	5,8	28	185	0,2	2,6	73	2
1999	SC	2,2	5,6	21	195	0,1	2,4	70	2
	CM	2,0	5,6	28	200	0,1	2,5	72	2
	SPD	1,9	5,4	28	176	0,1	2,5	68	3
2000	SC	3,3	5,5	19	169	0,1	3,0	68	4
	CM	3,3	5,7	26	162	0,1	3,0	73	2
	SPD	3,5	5,6	28	188	0,1	3,1	71	3
2001	SC	3,6	5,5	21	161	0,1	2,6	68	4
	CM	3,5	5,6	29	173	0,1	2,7	68	2
	SPD	3,6	5,6	38	171	0,1	2,9	67	4
2002	SC	2,7	5,8	23	248	0,1	2,9	57	4
	CM	2,7	5,7	43	205	0,1	2,9	58	4
	SPD	2,7	5,7	51	218	0,1	2,8	59	4
2003	SC	3,4	5,6	20	196	0,1	2,7	56	4
	CM	3,4	5,6	33	240	0,1	2,8	57	4
	SPD	3,7	5,6	44	232	0,1	3,0	57	4
2004	SC	1,6	5,6	26	256	0,1	3,3	55	4
	CM	1,9	5,5	35	245	0,1	3,1	53	4
	SPD	2,1	5,4	54	281	0,1	3,7	53	3

*Todos os resultados fornecidos por Denardin & Kocchann em 2005 (dados não publicados).

Tabela A7.3. Valores e teores dos indicadores de fertilidade do solo, na camada de 0-10 cm, e do rendimento de grãos de soja avaliados no experimento desde 1979 até 2004 em Santo Ângelo, utilizados para avaliação da técnica da normalização para expressar níveis de fertilidade dos solos (tratamentos c/N)

Ano*	Sistema de cultivo	Rend. t ha ⁻¹	pH	P -----mg dm ⁻³ -----	K cmol _c dm ⁻³	Al -----%-----	MO	V	m
1979 ¹	SC T/S	1,4	4,9	28	131		4,1		
	SPD T/S	1,2	4,9	28	131		4,1		
1985 ²	SC T/S	2,4	5,4	37	75		4,1		
	SPD T/S	2,5	5,1	37	89		3,7		
	Ba = SPD rotação	2,4	5,1	38	88		4,2		
	Ca = SPD rotação	2,8	5,4	23	47		3,8		
	Da = SPD rotação	2,5	5,5	34	56		4,0		
1991 ³	SC T/S	3,0	5,4	30	122	0,1	4,1	83	2
	SPD T/S	3,4	5,4	31	137	0,3	4,1	82	3
	Ca = SPD rotação	3,3	5,4	24	173	0,2	4,2	85	2
	Da = SPD rotação	3,2	5,2	45	169	0,2	4,5	81	2
1995 ³	SC T/S	2,2	6,0	24	134	0,0	3,3	79	0
	SPD T/S	3,3	5,8	28	153	0,1	3,3	76	2
	Ca = SPD rotação	3,3	5,8	24	163	0,1	3,5	77	1
	Da = SPD rotação	3,0	5,5	33	168	0,1	3,3	68	1
2004	Aa ₁ = SC T/S	2,1	5,2	12	238	0,5	4,2	64	5
	Fa = SPD T/S	2,8	5,3	19	271	0,2	4,7	67	2
	Ba = SPD rotação	2,6	5,1	18	172	0,7	3,8	57	9
	Ca = SPD rotação	2,7	5,3	15	311	0,2	4,4	69	2
	Da = SPD rotação	3,0	5,2	15	200	0,3	4,0	63	4

*Valores adaptados de: ¹Dalla Rosa (1981); ²Merten (1988); ³Resultados fornecidos por Giordani em 2005 (dados não publicados).

Apêndice 8. Principais contribuições para a compreensão dos sistemas abertos

As principais contribuições para a compreensão dos sistemas abertos foram dadas por Bogdanov, Bertalanffy e Prigogine. Por causa das percepções e das idéias defendidas por eles, atualmente têm-se uma noção clara de como funciona e evolui um sistema aberto, inclusive os sistemas vivos. Os sistemas abertos são mantidos pelas trocas de energia e de matéria com o ambiente, afastados do equilíbrio termodinâmico. A evolução desses sistemas por meio dos laços de realimentação e das instabilidades nos pontos de bifurcação, gerando propriedades emergentes e mudando de estados de ordem, é um fenômeno irreversível. Os sistemas abertos se auto-organizam no tempo. Nesse processo, a entropia interna do sistema diminui e a sua ordem e complexidade aumentam.

A obra “Tectologia” foi elaborada por Alexander Bogdanov, publicada entre 1912 e 1917, com o objetivo de esclarecer e generalizar os princípios de organização de todas as estruturas vivas e não-vivas. Bogdanov escreveu que os sistemas vivos são sistemas abertos que operam afastados do equilíbrio, distinguindo três tipos de sistemas: complexos neutros (atividade organizadora e desorganizadora se anula), complexos desorganizados (o todo é menor que a soma de suas partes) e complexos organizados (o todo é maior que a soma de suas partes). Explicou que a estabilidade e o desenvolvimento dos sistemas podem ser entendidos por dois mecanismos organizacionais básicos: formação e regulação ou auto-regulação. Para a formação, é fundamental a tensão entre crise organizacional e transformação. A crise é a manifestação da ruptura do equilíbrio sistêmico existente e, ao mesmo tempo, expressa a transição organizacional para um novo estado de equilíbrio. A obra Tectologia permaneceu por muito tempo desconhecida fora da Rússia (Capra, 1996).

Ludwig von Bertalanffy acreditava que os fundamentos mecanicistas eram inadequados para entender os fenômenos biológicos e que, para entendê-los, era necessária um novo modo de pensar. Isso era compartilhado pela percepção dos biólogos evolucionistas do século XIX: o universo evolui da desordem para a ordem, em direção a estados de complexidade crescente e não para a desordem, como afirmava a termodinâmica clássica (Capra, 1996). Na sua “Teoria Geral dos Sistemas”, em 1945, Bertalanffy reconheceu que os

organismos vivos são sistemas abertos (reconhecido na Tectologia) e que não podem ser descritos pela termodinâmica clássica; assim, deu um passo fundamental para resolver o dilema entre um mundo de desordem crescente e um mundo vivo de ordem crescente. Esse autor explicou as diferenças entre os sistemas fechados e os abertos e que a expressão “o todo é mais que a soma das partes” significa que as características constitutivas do sistema não são explicáveis a partir das suas partes isoladas, mas a partir do conhecimento dessas e das suas relações. Os sistemas fechados trocam energia com o ambiente, tendem para a máxima desordem e se mantêm em equilíbrio químico e termodinâmico. Os sistemas abertos trocam matéria e energia com o ambiente, são mantidos pelo fluxo contínuo dessas e pela construção e a decomposição de componentes enquanto vivos e afastados do equilíbrio num estado estacionário. Com a concepção de sistema aberto, a aparente contradição entre a entropia¹¹ (desordem) e a evolução (crescimento de ordem) desaparece. Nos processos irreversíveis, o aumento da entropia é compensado pela importação de entropia, que pode ser entropia negativa (ordem ou organização). Assim, a entropia interna do sistema pode diminuir e os sistemas vivos, além de evitar o aumento da entropia podem se desenvolver em sentido de ordem e organização crescentes (Bertalanffy, 1977).

A termodinâmica clássica atribui às leis da natureza caráter reversível, ou seja, nega radicalmente os efeitos do tempo. Isso não era aceito por Ilya Prigogine, pois para ele “nenhum esquema conceitual havia estabelecido a equivalência entre uma planta que cresce, floresce e morre e uma planta que revive, se torna jovem outra vez e retorna às suas sementes”, e passado e futuro desempenham papéis diferentes na maioria dos fenômenos (Prigogine & Stengers, 1992). Em 1947, Prigogine propôs a auto-organização dos sistemas abertos associada ao afastamento do equilíbrio num artigo sobre a termodinâmica do não-equilíbrio. As suas primeiras pesquisas mostraram um quadro contraditório devido a dois erros fundamentais da física clássica: estudar condições de equilíbrio e ignorar que muitos fenômenos são não-lineares. O gigantesco desafio de remediar esses erros foi uma das mais extraordinárias conquistas culturais atuais, cumprida por Prigogine entre os

¹¹ Entropia é a medida da quantidade da desordem de um sistema. A entropia permanece constante nos processos reversíveis e aumenta nos irreversíveis. Nos sistemas abertos o aumento de entropia implica no aumento da desordem e diminuição no aumento da ordem.

anos 50 e 70. Para demonstrar o primeiro, ele propôs a termodinâmica do não-equilíbrio ou dos processos irreversíveis, em que considerou o efeito do tempo, que caracteriza a criatividade e a evolução dos seres vivos, essencial; e para o segundo, utilizou a sofisticada matemática dos sistemas não-lineares (Prigogine, 2003). Com esses dois instrumentos, estudou a evolução dos sistemas abertos e descreveu a auto-organização destes na sua “Teoria das Estruturas Dissipativas”, recebendo por esta o prêmio Nobel em Química em 1977. Na teoria, as principais características das formas vivas estão ligadas ao arcabouço conceitual e matemático coerente e acarretam uma mudança de percepção da estabilidade para a instabilidade, da desordem para a ordem, do equilíbrio para o não-equilíbrio, do ser para o vir-a-ser. Com essa teoria, Prigogine resolveu o quebra-cabeça da coexistência entre estrutura e mudança, entre ordem e dissipação, e foi muito além da concepção de sistemas abertos ao incluir nela a idéia de pontos de instabilidades nos quais novas estruturas e formas de ordem podem emergir (Capra, 1996).

Segundo Prigogine & Stengers (1992), as exigências mínimas para pensar na evolução dos sistemas abertos são: 1) a condição de irreversibilidade, ou seja, introduzir a quebra da simetria temporal; 2) dar sentido à noção de acontecimento ou evento com uma descrição probabilista, 3) compreender que certos acontecimentos são capazes de transformar o sentido da evolução e que esta dá sentido ao acontecimento e de gerar novas coerências ou possibilidades de história. Assim, compreender uma história é compreender ao mesmo tempo coerências e acontecimentos.

Prigogine verificou que próximo do equilíbrio, um sistema é estável e que longe do equilíbrio, um sistema é instável e os processos irreversíveis são fontes de coerência. Longe do equilíbrio, se estabelecem correlações de longo alcance que geram atividade coerente da matéria ou novas estruturas, chamadas de estruturas dissipativas. Com esta denominação, ele enfatizou a estreita associação entre estrutura e ordem, de um lado, e de dissipação, de outro, e expressou uma forma de organização supermolecular que reflete a situação global de não-equilíbrio que lhe deu origem. Longe do equilíbrio, é possível reconhecer certa autonomia que permite falar das estruturas do equilíbrio como processo de auto-organização. A atividade do sistema se organiza a partir de um “vínculo”, que pode ser o fluxo de matéria ou de energia

que o mantém afastado do equilíbrio, tornando-o sensível e capacitando-o a criar novas estruturas. A sensibilidade do sistema (a si mesmo) está associada à sua instabilidade, às flutuações de sua própria atividade. A alta sensibilidade do sistema e a sua instabilidade definem a singularidade dos pontos de bifurcação. Nestes pontos, o sistema se torna instável e pode evoluir na direção de vários regimes estáveis de funcionamento. À medida que um sistema se afasta do equilíbrio, a força termodinâmica imposta ao mesmo atinge valores suficientemente elevados para passar do regime linear para o não-linear, pode atingir um regime caótico e atravessa áreas de instabilidade nas quais seu comportamento muda de modo qualitativo (Prigogine & Stengers, 1992).

O não-equilíbrio é uma fonte de ordem. Nos pontos de instabilidade, a ordem emerge espontaneamente. Num processo auto-organizador, existem laços de realimentação que promovem a emergência de estruturas de ordem crescente em sucessivos pontos de bifurcação. Um ponto de bifurcação é um limiar de estabilidade no qual a estrutura dissipativa pode se decompor ou então emergir num dentre vários novos estados de ordem. O comportamento de uma estrutura dissipativa afastada do equilíbrio não segue uma lei universal, é específico do sistema. A existência de pontos de bifurcação que permitem ao sistema “escolher” dentro de vários caminhos possíveis implica na indeterminação do estado seguinte. Esta “escolha” depende da história do sistema e das condições externas, inclusive neste ponto o sistema é muito sensível às suas pequenas flutuações, conduz à emergência de novas formas de ordem, ou seja, “ordem por meio de flutuações”. Numa sucessão de bifurcações (Figura A8.1.) coexistem zonas deterministas (entre as bifurcações) e pontos de comportamento probabilista (os pontos de bifurcação). A evolução de um sistema que se afasta progressivamente do equilíbrio ao longo do tempo tem um elemento histórico, ex.: um sistema que está no estado d_2 significa que ele atravessou os estados b_1 e c_1 . Por causa da indeterminação nos pontos de bifurcação e da imprevisibilidade pela não-linearidade devido às iterações repetidas, o comportamento das estruturas dissipativas só pode ser previsto num curto lapso de tempo. Em função dessa indeterminação, os processos irreversíveis desempenham um papel construtivo e indispensável à irreversibilidade, que é o mecanismo que produz ordem a partir do caos (Capra, 1996).

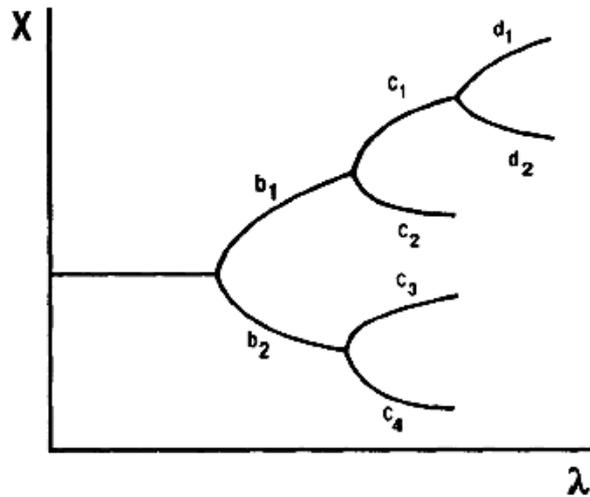


Figura A8.1. Diagrama de bifurcações sucessivas num sistema longe do equilíbrio (Prigogine & Stengers, 1992).

Nos sistemas dinâmicos instáveis, devido à sensibilidade às condições iniciais, uma pequena modificação na condição inicial promove divergência exponencial nas trajetórias ao longo do tempo. Eles levam ao indeterminismo, consequência natural da instabilidade e do caos, dá significado fundamental à flecha do tempo e permite compreender as duas características essenciais da natureza: unidade e diversidade. Este modelo expressa o que se percebe no mundo: flutuações em todos os níveis, bifurcações e instabilidades. Para que um sistema atinja o estado de estrutura dissipativa (se manter organizado imerso na desordem) e possa evoluir, é necessário o afastamento do equilíbrio pelos fluxos de matéria e de energia que o alimentam e a geração de instabilidade, integrados num funcionamento auto-organizativo no tempo. Nos momentos de instabilidade, nos pontos de bifurcação, emergem novas propriedades e surge nova organização que induz o sistema a evoluir e atingir uma nova estabilidade — um novo nível de ordem (Prigogine, 1996).

Na “Teoria das Estruturas Dissipativas”, a auto-organização, a emergência espontânea da ordem, resulta dos efeitos combinados do não-equilíbrio, da irreversibilidade dos laços de realimentação e da instabilidade. A natureza radical da visão do Prigogine é evidente, muitas das características chaves das estruturas dissipativas são novas concepções revolucionárias na ciência clássica e são estruturas básicas de todos os seres vivos, isto é dos sistemas abertos (Capra, 1996).